

**Gewölbte Brücken des 19. Jahrhunderts.
Vom Mauerwerk zum Stampfbeton.**

Karen Veihelmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktoringenieur (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer

Prof. Dr. phil. Andreas Kahlow

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser

Die Dissertation wurde am 18.09.2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 29.03.2016 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 08.04.2016 statt.

KURZFASSUNG

Das 19. Jahrhundert wird in der Bautechnikgeschichte weithin als das Jahrhundert des Eisens bezeichnet. Ab der Mitte des 19. Jahrhunderts beginnt jedoch die Rückbesinnung auf massive Brückenkonstruktionen, die um die Wende zum 20. Jahrhundert einen wahren Boom an derartigen Bauwerken in immer kühneren Abmessungen nach sich zieht.

Die Gründe hierfür sind vielschichtig, hauptsächlich ist jedoch die Einführung des Portlandzements zu nennen. Hohe Festigkeit, schnelle Erhärtung und nach einer Einführungsphase auch gute Kontrollierbarkeit des Bindemittels und seiner Eigenschaften ermöglichten eine neue Bauweise, nämlich Konstruktionen aus kleinteiligen, weitgehend unbearbeiteten Steinmaterialien mit hochfesten Zementmörteln herzustellen.

Mit dieser Bauweise war zum einen eine drastische Kostensenkung im Vergleich zum Werksteinbau, zum anderen ein explosionsartiger Fortschritt in der Technik der gewölbten Brücken möglich. Wurden anfänglich sowohl die Bauverfahren als auch die Ästhetik der Brücken noch eng an den konventionellen Mauerwerksbau angelehnt, so verschärfte die neue Bauweise bisher untergeordnete Probleme: Die schnelle Erhärtung des Bindemittels sowie die wachsenden Spannweiten erhöhten die Gefahr der Rissbildung deutlich. Diese geänderten Rahmenbedingungen erforderten in der Folge Anpassungen in der Bautechnik wie etwa das Vorbelasten des Lehrgerüsts, abschnittsweises Betonieren bis hin zur Einführung von Gelenken – um nur die wichtigsten zu nennen.

Neben der Aufarbeitung der beschriebenen historischen Zusammenhänge legt vorliegende Arbeit auf diese Bautechniken einen besonderen Fokus: Nach der Erläuterung der Problemstellung werden die einzelnen Innovationen beschrieben sowie deren Vor- und Nachteile bewertet und daraus die Entwicklungsgeschichte insbesondere im Hinblick auf die Verwendung von Beton hergeleitet. Dabei wird stets der Bezug zur Praxis, insbesondere zu den rund 150 im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Brückenbauten hergestellt. Viele Spuren der Bautechnik kann man nämlich an den derzeit noch vorhandenen Bauwerken ablesen; diese stellen einen ganz entscheidenden Teil des Denkmalwertes einer solchen historischen Brücke dar.

Ein besonderes Anliegen der Verfasserin gilt dem heutigen Umgang mit diesen Bauwerken. Die Praxis zeigt, dass viele Konstruktionen durch sinnlose, völlig übertriebene Maßnahmen ihrer Denkmaleigenschaften beraubt wurden und werden – oftmals weil das Wissen um die Bauweise und somit die Grundlage für eine Beurteilung von Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit fehlt. Anhand von Negativ- wie Positivbeispielen werden typische, aktuelle Nutzungsanforderungen diskutiert und Hinweise für die Bewertung von Sanierungs- oder Ertüchtigungsmaßnahmen gegeben.

ABSTRACT

ABSTRACT

The nineteenth century is generally considered as the great age of building with iron. However, around the middle of the century, masonry construction also experienced a significant revival, and the turn of the century witnessed a remarkable great boom of concrete bridges with unprecedented spans. The reasons for this development were manifold. However, the introduction and general availability of Portland cement was definitely a decisive factor. The high strength, quick hardening and – after some tentatives – quality controlled production processes assured the rapidly increasing use of this new binder, permitting challenging constructions which relied exclusively on „small materials“ and high-strength cement mortar. The novel construction technology enabled considerable savings on costs as compared to traditional ashlar construction, and consequently spurred a dramatic development of arch bridges. Initially, the construction sequences and the aesthetics of the bridges still followed classical masonry paradigms, but some properties of the new technology soon forced considerable change: The rapid hardening of the cement mortar, as well as the unprecedented spans, aggravated problems of cracking. These problems were tackled by specifically adapted techniques such as ballasting the centres, vaulting in rings and sections, and the introduction of artificial hinges, to mention just a few.

The present thesis puts these historic developments into perspective. It discusses the individual innovation steps in detail, evaluates the associated advantages and drawbacks, and puts them into relation with the general development of modern concrete construction. The study is carried out against the backdrop of more than 150 still extant bridges which have been analysed. Visible traces on the real objects still testify to the contemporary methods of construction. They contribute essentially to the monumental qualities of the preserved examples of early concrete bridge building.

Finally, adequate preservation is one of the author's prime concerns. Unfortunately, current renovation practice often leads to the complete loss of the essential monumental qualities of the early concrete structures. One reason for this infelicitous practice is simple lack of knowledge and awareness, entailing inadequate assessments of structural stability and durability of these century-old structures. On the basis of several case studies – both positive and negative – possible rehabilitation methods are discussed which may be applied to ensure that the historic structures will meet future demands.

VORWORT

Der Wunsch, mich mit der Geschichte des Betonbaus zu beschäftigen, begleitet mich bereits viele Jahre. Und so bin ich besonders dankbar für die Möglichkeit, die mir Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer gab, dieses Thema zum Massivbrückenbau des 19. Jahrhunderts an seinem Lehrstuhl an der Universität der Bundeswehr München zu bearbeiten. Er hat in dieser Zeit meine Arbeit mit großem Interesse, kritischen Anmerkungen und wertvollen Diskussionen unterstützt. Er stellte seine umfassenden Sprachkenntnisse im Umgang mit fremdsprachigen Publikationen zur Verfügung und ermöglichte mir den uneingeschränkten Zugang zu seiner inzwischen auch im Betonbau ansehnlichen Privatbibliothek mit historischer Fachliteratur – viele Neuerwerbungen wurden sogar durch die Bearbeitung des Themas veranlasst und auf diese Weise dann im Original zugänglich. Des Weiteren komplettierte er mit seinen ergänzenden Forschungen, insbesondere im Wasserbau und in der frühen französischen Literatur zum Betonbau, das Bild der Bautechnikgeschichte im Betonbrückenbau. Für alles sei ihm herzlich gedankt. Mein Dank gilt auch Prof. Dr. phil. Andreas Kahlow für die wertvollen Hinweise, die der Einordnung des Themas in den weiteren Rahmen der Bautechnikgeschichte dienlich waren sowie für die Bereitschaft, die Begutachtung meiner Dissertation zu übernehmen.

Im Rahmen vorliegender Arbeit waren zahlreiche Anfragen an Privatpersonen, Vereine, Ämter, insbesondere aber an Bibliotheken und Archive notwendig. Hier wurde mir eine große Hilfsbereitschaft zuteil, für die ich mich ganz herzlich bedanken möchte. Von den unzähligen Mitarbeitern in Bibliotheken und Archiven möchte ich namentlich Cornelia Beutel und ihren Mitarbeiterinnen von der Fernleihstelle der Universität der Bundeswehr München besonders danken. Weiterhin gilt mein herzlicher Dank Dr. Matthias Seeliger und Prof. Dr.-Ing. Georg Maybaum für den regen Austausch sowie den unbürokratischen Zugang zum Unternehmensarchiv Bernhard Liebolds im Stadtarchiv Holzminden sowie dessen uneingeschränkte Nutzung.

Desgleichen danke ich Franziska Röser, Dr. Burkhard Bornemann, Dr. Michael Hascher sowie Stefan Giese für die kritische Durchsicht und Korrektur der fertiggestellten Arbeit. Ihre Hinweise waren mir wertvolle Hilfe. Von ganzem Herzen danke ich meiner Familie, die mir ein unverrückbares Fundament ist und mich jederzeit in allen meinen Vorhaben unterstützt. Allen genannten und ungenannten Menschen, die in irgendeiner Weise einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit geleistet haben, gilt mein herzlicher Dank.

Neubiberg, im September 2015

Karen Veihelmann

:

INHALT

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	i
ABSTRACT	ii
VORWORT	iii
INHALTSVERZEICHNIS	iv
1 EINFÜHRUNG	1
1.1 Anlass der Forschungsarbeiten	1
1.2 Stand der Wissenschaft	2
1.3 Ziel der Arbeit und Methodik	3
2 GRUNDLAGEN	5
2.1 Die Entwicklung des Brückenbaus zum Ende des 19. Jahrhunderts: Die Renaissance der Massivbauweise	5
2.2 Definitionen und Begriffe	11
3 BETON	15
3.1 Das Material Beton: Die Anfänge im Wasserbau	15
3.2 Die Bautechnik: Vom Pisébau zum Stampfbeton	17
3.2.1 Der Pisébau	18
3.2.2 Der Kalk-Sand-Pisébau	20
3.2.3 Der Stampfbeton	23
3.2.4 Zement und Beton	33
4 DER MONOLOTHISCHE BOGEN	41
4.1 Die Entwicklung des monolithischen Gewölbes im Hochbau	41
4.2 Erste Beispiele von Bogenbrücken aus Beton in Frankreich	51
4.3 Erste Bogenbrücken aus Beton im deutschsprachigen Raum	59
4.4 Prohebogen und Ausstellungsbrücken	63
4.5 Bernhard Liebold und seine frühen Betonbogenbrücken	72
5 BAUTECHNIK VON STAMPFBETONBOGENBRÜCKEN	82
5.1 Lehrgerüste	82
5.1.1 Gerüstkonstruktionen	82
5.1.2 Ausrüstvorrichtungen	92
5.1.3 Schalung	99
5.1.4 Rationalisierung bei der Konstruktion von Lehrgerüsten	104
5.2 Herstellung des Betons	108
5.3 Betonieren	110
6 DER EINGESPANNTE BOGEN	119
6.1 Tragverhalten eines eingespannten Bogens	120
6.2 Das Problem der Rissbildung in Massivbogenbrücken	122
6.2.1 Formänderungen des Lehrgerüstes während des Baus	123
6.2.2 Risse beim Ausrüsten	125
6.2.3 Risse nach dem Ausrüsten	129
6.2.4 Risse während der Nutzungsdauer	137

6.3	Lösungsansätze durch Anpassungen in der Bautechnik	144
6.3.1	Vorbelasten des Lehrgerüsts	144
6.3.2	Offene Fugen und nachträglicher Verguss	145
6.3.3	Wölben in Ringen	149
6.3.4	Wölben in Abschnitten	153
7	DIE VERWENDUNG VON GELENKEN IN MASSIVBRÜCKEN	158
7.1	Von der Idee und der wissenschaftlichen Betrachtung von definierten Drehpunkten in Gewölben: Jules Dupuit und Friedrich Heinzerling	158
7.2	Von der ersten Ausführung von Gelenken in Deutschland: Claus Köpcke und Karl von Leibbrand	164
7.3	Die weitere Entwicklung der Gelenkbogenbrücken in Deutschland	167
7.4	Die Anwendung von Gelenken: Zur gegensätzlichen Entwicklung in Frankreich und Deutschland	177
7.5	Die Ausführung von Gelenken in Massivbrücken	182
7.5.1	Sollbruchstellen	183
7.5.2	Gelenkeinlagen	184
7.5.3	Stein- und Betongelenke	191
7.5.4	Das Problem des Querschnittes im Gelenkblock	198
7.5.5	Wälzgelenke	203
7.5.6	Verschiebungen im Gelenk: Rutschen und Gleiten	205
7.5.7	Zapfengelenke	214
7.5.8	Federgelenke Bauart Mesnager	216
7.5.9	Betongelenke Bauart Freyssinet	218
7.5.10	Sonderformen	219
7.6	Die Bemessung eines Dreigelenkbogens	221
7.7	Die Verwendung von Gelenken in schiefen Brücken am Beispiel der Hammerkanalbrücke in Esslingen	223
8	DENKMALPFLEGE	231
8.1	Konstituierende Merkmale	234
8.2	Erhöhte Anforderungen	235
8.3	Bewertung	237
8.4	Eisenbahnbrücke über die Iller in Lautrach	246
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	254
ANHANG		261
LITERATUR UND QUELLEN		261
PERSONEN UND UNTERNEHMEN		324
INDEX DER GENANNTEN BRÜCKEN		328
ABBILDUNGSNACHWEIS		338
ABBILDUNGSKATALOG		A-1
BRÜCKENKATALOG		B-1

1 EINFÜHRUNG¹

1.1 Anlass der Forschungsarbeiten

Im Jahr 2010 stellten die Stadtwerke München einen Abrissantrag für den 1890 von der Firma Dyckerhoff & Widmann erstellten Teufelsgrabenaquädukt² in Grub, Gemeinde Valley, in der Nähe von München. Dieses sehr frühe, noch erhaltene Brückenbauwerk aus Stampfbeton ist in seiner künstlerischen Gestaltung außergewöhnlich reich ausgestattet. Neben der aus Beton erstellten Rustika-Gliederung waren insbesondere auch die Schlusssteine mit dem Stadtwappen – dem sogenannten Münchner Kindl – bemerkenswert, gerade auch deshalb, weil eine solch reiche Ausschmückung in der abgelegenen Lage des Bauwerkes sehr unüblich war.

Der Aquädukt war zu der Zeit des Abrissantrages bereits über zehn Jahre ohne Nutzung und aufgrund mangelhafter Instandhaltung an einigen Stellen schadhaft. Da immer wieder kleine Teile insbesondere der Gesimse und Kanten herabfielen und die Verkehrssicherheit des darunter befindlichen Wanderwegs gefährdeten, sollte der Aquädukt kurzerhand abgerissen werden. Ein Gutachter, der die angebliche Einsturzgefahr bescheinigte, war schnell gefunden und der Abriss schien gewissermaßen beschlossene Sache.

Eine von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer ins Leben gerufene Initiative [Holzer 2010a; Holzer 2010b; Holzer 2010d] für den Erhalt des Teufelsgrabenaquäduktes zog binnen kurzer Zeit zahllose namhafte Unterstützer an. Weitere Untersuchungen am Aquädukt eröffneten ein Forschungsfeld, dem sich bis dato niemand systematisch gewidmet hatte. Es folgten erste Veröffentlichungen [Holzer 2010c; Holzer, Voigts 2011]³ sowie eine am Institut erstellte Masterarbeit zum Tragverhalten des Bauwerkes [Ley 2011], die die Verfasserin vorliegender Dissertation schließlich dazu veranlassten, an die Universität der Bundeswehr in München zu wechseln und sich diesem Forschungsgebiet zu widmen.

Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes schien sich zwar die Situation des Teufelsgrabenaquäduktes zu entspannen, Planungen für eine Sanierung stehen an [dvw 2013; Hager 2014]. Jedoch waren auch Negativbeispiele an der Tagesordnung, bei denen teilweise herausragende Bauwerke „saniert“ und damit ihrer technischen oder optischen, denkmalkonstituierenden Merkmale beraubt oder betreffende Brücken gleich ganz abgerissen wurden:⁴ Eines der tragischsten Beispiele hierfür ist die Bodebrücke⁵ von

¹ Redaktionelle Hinweise: Die vorliegende Arbeit besteht aus drei Teilen: Textteil, Abbildungs- und Brücken-katalog. Der Textteil ist einfach durchnummeriert, der Abbildungskatalog mit vorangestelltem A-, der Brücken-katalog mit B- sowie der entsprechenden Seitenzahl. Verweise im Text erfolgen auf Abbildungs- bzw. Brückennummer. Brücken- sowie Personenindex erleichtern das schnellere Auffinden bestimmter Bauwerke bzw. Personen im Text sowie in den Katalogen. Der Verweis in den beiden Indexen erfolgt auf die Seitenzahlen der drei Teile. Die Lebensdaten wichtiger Protagonisten finden sich im Personenindex. Wörtliche Zitate wurden zeichengenau übernommen, auch wenn dies nicht der aktuell gültigen Rechtschreibung entspricht. Die Übersetzung fremdsprachiger Zitate erfolgte in erster Linie durch die Verfasserin, in wenigen Fällen – insbesondere bei italienischen Zitaten – durch Prof. Holzer. Um etwaige durch Übersetzungen ausgelöste Ungenauigkeiten zu vermeiden bzw. um dem Leser eine eigene Meinungsbildung zu erleichtern, wurden die Zitate zusätzlich in der Originalsprache wiedergegeben.

² Beschreibung im Katalog unter BY26.

³ Vgl. auch [Veihelmann, Holzer 2012].

⁴ Vgl. Kap. 8.

Staßfurt. Die 1880 erbaute und 1934 erweiterte Brücke zeigte Schäden an ebenjener Erweiterung. Nach Angaben der Stadt Staßfurt sei die ursprüngliche Bogenkonstruktion von 1880 noch völlig in Ordnung gewesen [Aertel 2011], trotzdem wurde die Brücke im August 2013 abgerissen und durch einen Neubau ersetzt.

Solche Negativbeispiele für den Verlust von Denkmalsubstanz, die oftmals auf unzureichende Kenntnis der Bauweise gründen, zeigen, dass die Wichtigkeit, insbesondere die Eigentümer sowie die staatlich organisierte Denkmalpflege für dieses Thema zu sensibilisieren, nach wie vor aktuell ist.

1.2 Stand der Wissenschaft

Moderne Literatur über Mauerwerksbrücken sowie über Stahlbetonbrücken gibt es zuhauf, der Übergang von der einen auf die andere Bauweise ist nahezu unbeleuchtet. Abgesehen von einigen wenigen Aufsätzen von Klaus Stiglat [z. B. Stiglat 1995; Stiglat 1997; Stiglat 1999a; Stiglat 1999b, Stiglat 2004 sowie Stiglat 2012] erwiesen sich die Brücken aus Stampfbeton als geradezu prädestiniert für eine intensive Auseinandersetzung.

Zusammenfassende Standardwerke zum Betonbau im Allgemeinen sind beispielsweise die Monographie „*Concrete. The vision of a new architecture*“ von Peter Collins aus dem Jahr 1959 [Collins 1959], das weitbekannte zweibändige Werk „*Vom Caementum zum Spannbeton. Beiträge zur Geschichte des Betons*“, herausgegeben von Günter Huberti aus dem Jahre 1964 [Huberti 1964] und das im Jahr 2004 von Uta Hassler und Hartwig Schmidt herausgegebene „*Häuser aus Beton. Vom Stampfbeton zum Großtafelbau*“ [Hassler, Schmidt 2004]. Peter Collins beschreibt in einem einleitenden Teil die Geschichte des Betonbaus – und darin auch den unbewehrten Beton – sehr detailliert und fundiert [Collins 1959, S. 19–55]. Der Hauptfokus des Werkes liegt jedoch auf den frühen Werken aus Eisenbeton und hier insbesondere des französischen Architekten Auguste Perret. Das Werk von Huberti erweckt den Anschein, eine „vollständige“ Geschichte des Zements und Betons liefern zu wollen und besticht dabei durch eine Masse an Informationen, die in dieser Dichte sicher in keinem anderen deutschsprachigen Werk zu diesem Thema zu finden ist. Gerade zum Stampfbeton sind die Ausführungen hier aber äußerst kurz ausgefallen. Der Sammelband von Hassler/Schmidt besteht wiederum aus mehreren vertiefenden Aufsätzen zu verschiedenen Beton Themen; zum Stampfbeton seien hier insbesondere die beiden Artikel von Klaus Stiglat und Matthias Seeliger erwähnt, die die beiden Betonbaupioniere François-Martin Lebrun sowie Bernhard Liebold behandeln [Stiglat 2004 und Seeliger 2004].⁶ Die genannten Werke widmen sich jedoch gar nicht oder nur nebensächlich dem Thema des Brückenbaus in Stampfbeton.

Das von Hartwig Schmidt im Jahr 1999 herausgegebene Sonderheft der Zeitschrift Beton- und Stahlbetonbau „*Zur Geschichte des Stahlbetonbaus – Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910*“ enthält einige interessante Artikel über die Thematik [Schmidt 1999]. Insbesondere sind hier der sehr ausführliche Artikel zur Entwicklung von Stampfbeton im

⁵ Vgl. Kap. 4.5.

⁶ Beide werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch ausführlich vorgestellt. Zu Lebrun vgl. hauptsächlich Kap. 4.1 sowie 4.2, zu Liebold in erster Linie Kap. 4.5.

Hochbau von Andreas Kahlow [Kahlow 1999] sowie die bereits weiter oben erwähnte Abhandlung von Klaus Stiglat zu den ersten Brücken in Beton [Stiglat 1999b] zu nennen.

Ein äußerst aufschlussreiches Buch lieferte Knut Stegmann 2014 mit seinem aus seiner Dissertation entstandenen Buch „*Das Bauunternehmen Dyckerhoff & Widmann. Zu den Anfängen des Betonbaus in Deutschland 1865–1918*“. Wenngleich Stegmanns Fokus auf der Unternehmensgeschichte und der Auswertung des Firmenarchivs lag, so hat er dennoch in akribischer Kleinarbeit viele historische Quellen – auch zum Stampfbetonbrückenbau – gefunden und ausgewertet. Dennoch: Eine Arbeit mit dem Schwerpunkt der unbewehrten Brücken fehlte noch immer.

Gemessen an der relativ kurzen Epoche, in der der Stampfbeton im deutschen Brückenbau eine bedeutende Rolle spielte, gab es eine vergleichsweise hohe Anzahl an bauzeitlichen Publikationen: Hierzu zählen insbesondere die Artikel in den historischen Bauzeitschriften wie auch die allgemeine Brückenbauliteratur um die Wende des 19. zum 20. Jahrhundert [z. B. Barkhausen 1892; Emperger 1908a; Melan 1911; usw.]. Eine systematische Aufarbeitung fand bis heute nicht statt und da der Stampfbeton nur kurze Zeit später vom Eisen- bzw. Stahlbeton verdrängt wurde, blieb über kurze, oberflächliche, von Veröffentlichung zu Veröffentlichung kopierte Randdaten hinausgehend kaum etwas übrig.

1.3 Ziel der Arbeit und Methodik

Vorliegende Arbeit hat zum Ziel, die Bautechnik von Stampfbetonbrücken zu beleuchten. Dabei wird lediglich ein einziger Bautyp betrachtet, um in der Masse der Literatur einen klaren Fokus auf relevante Entwicklungsschritte behalten zu können. Brücken bieten sich für eine solche Betrachtung in nahezu idealer Weise an, da sie als technisch anspruchsvolle Ingenieurbauwerke vielfach beschrieben wurden und insbesondere mit den wachsenden Spannweiten auch eigene bautechnische Probleme aufwarfen. Lösungsvorschläge wurden zwar teilweise aus dem Mauerwerksbau übernommen, mussten aber auch auf die betonspezifischen Anforderungen angepasst werden. Darüber hinaus können Brücken in ihrem heutigen Zustand oftmals wertvolle Hinweise am Bauwerk selbst liefern. Bei anderen Bautypen fällt insbesondere die handnahe Untersuchung am Bauwerk zumeist weg, da Oberflächen nicht sichtbar sind. So befinden sich z. B. die Ingenieurbauten des Wasserbaus – also beispielsweise Schleusen und Staudämme – größtenteils unter der Wasseroberfläche und sind deshalb mit einfachen Mitteln kaum zu untersuchen. Wohnbauten sind zumeist verputzt, originale Oberflächen mit Sichtbeton sind – wenn überhaupt – nur in Kellern noch vorhanden. Zudem bieten Brücken den Vorteil der meist unbeschränkten Zugänglichkeit. Wenngleich nicht immer eine handnahe Untersuchung des kompletten Bauwerks möglich war, so konnte doch mit vergleichsweise einfachen Mitteln, beispielsweise mit Hilfe eines Fernglases, ein guter Eindruck der Oberflächen gewonnen werden. Auf diese Art der Untersuchung wurde in vorliegender Arbeit größter Wert gelegt, da die Befunde an den Objekten die Thesen aus Literatur und Quellen stützen bzw. widerlegen können.

Die Erarbeitung des Themas setzte eine intensive Recherche nach vorhandener Brückenbauwerke voraus. Dazu wurden mehrere Methoden angewandt: Zum einen

EINFÜHRUNG

wurden Denkmallisten insbesondere in Baden-Württemberg und Bayern durchgearbeitet. Zum anderen wurden Informationen zu in der Literatur genannten Brücken eingeholt. Hier wurden zuerst die üblichen Internetwerkzeuge verwendet. Ausdrücklich zu nennen sind hier auch mehrere mit hohem Engagement privat betriebene Internetseiten (z. B. sachsenschiene.net; bahntrassenradeln.de; karl-gotsch.de), die in akribischer Kleinarbeit Informationen zu bestehenden und umgenutzten Bahntrassen sowie Brücken im Allgemeinen zusammengetragen haben. Auf diese Weise konnte eine sehr effektive Vorrecherche betrieben, eine sinnvolle Auswahl an Brückenbauwerken getroffen und diese dann handnah untersucht werden. Weiterhin konnten so gezielte Anfragen an einschlägige Archive gestellt werden. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden demnach ca. 150 Brücken untersucht. Ergebnisse aus diesen Untersuchungen werden im Text besprochen. Die Objekte werden zudem im Katalog in der Anlage jeweils kurz vorgestellt. Die Dokumentation erfolgte in den meisten Fällen schriftlich sowie fotografisch, in einigen Fällen wurde ein tachymetrisches Aufmaß erstellt. In Einzelfällen wurden Untersuchungen mit dem Georadar unternommen.

Ergänzt wurde die Objekt-Forschung durch eine umfangreiche Sichtung der bauzeitlichen Literatur. Dazu erfolgte eine umfassende Recherche in Bibliothekskatalogen (z. B. KVK) sowie systematisches Durcharbeiten der relevanten Jahrgänge der deutschen, teilweise auch internationalen Bauzeitschriften.

Aus den Informationen, die Objekt und Literatur liefern, wird die Entwicklungsgeschichte der Massivbogenbrücken des 19. und frühen 20. Jahrhunderts insbesondere im Hinblick auf die Verwendung von Zement nachgezeichnet. Dabei beginnt der Betrachtungszeitraum bei den Hochbauten, die mittels Stampftechniken erbaut wurden, sowie bei Wasserbauten, bei denen das Material Beton besonders früh eingesetzt wurde. Mit der Zusammenführung beider Entwicklungsstränge – der Bautechnik des Pisés mit dem Material Beton – geht die Entwicklung weiter über die Betrachtung des Bogens, also von den ersten Hochbaugewölben bis hin zu den Bogenbrücken. Im Anschluss wird dann die Bautechnik der Mauerwerks- und unbewehrten Betonbrücken vertieft. Eine denkmalpflegerische Betrachtung zum heutigen Umgang mit den Bauwerken schließt die Arbeit ab.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Die Entwicklung des Brückenbaus zum Ende des 19. Jahrhunderts: Die Renaissance der Massivbauweise

Im Verlauf des 19. Jahrhunderts ereilte Europa ausgehend von England eine einschneidende Veränderung: Die Industrialisierung wandelte die vorhandenen Strukturen verschiedenster Bereiche. Vormals durch kleinere Handwerksbetriebe geprägt, konzentrierte sich die Erzeugung von Waren vermehrt auf große Fabrikanlagen. Dadurch verstärkte sich der Transport von Rohstoffen wie auch von hergestellten Gütern. Mit der Eisenbahn wurde in den deutschen Ländern seit den 1830er Jahren ein weiteres Transportmittel bereitgestellt. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts folgte der Ausbau eines weit verzweigten Netzes von Eisenbahnstrecken. Die spezifischen Anforderungen insbesondere beim Überqueren von Geländeeinschnitten – die Führung des Weges durch das Tal mittels Serpentinafen oder größerer Steigungen wie es bei Fahrwegen möglich war, war technisch ausgeschlossen – ergaben einen enormen Bedarf an Brückenbauten.

Während zuvor hauptsächlich mit Holz⁷ oder Stein gebaut wurde,⁸ eröffneten verbesserte Herstellungs- und Verarbeitungstechniken⁹ für das Baumaterial Eisen völlig neue Möglichkeiten in der Konstruktion von Bauwerken,¹⁰ insbesondere aber von Brücken. Dies führte zu einer wahren Euphorie im Eisenbrückenbau:¹¹ Im Laufe des 19. Jahrhunderts

⁷ Bezüglich der eingeschränkten Eignung des Baustoffes Holz zum Brückenbau waren sich die Ingenieure insbesondere gegen Ende des 19. Jahrhunderts einig. So ist im Handbuch der Ingenieurwissenschaften 1899 über Holzbrücken zu lesen: „Die Holzbrücken spielen in der neueren Zeit wegen der ihnen eigenthümlichen raschen Vergänglichkeit und Feuergefährlichkeit nur noch eine untergeordnete Rolle. Sobald es sich um endgiltige Brücken handelt, sind sie weder für Strassen- noch für Eisenbahnbrücken empfehlenswert, wo Eisen und Stein in ernsten Wettbewerb treten kann. Ihr Hauptgebiet sind rasch herzustellende, für kurze Zeit erbaute Interims- oder Notbrücken.“ [Landsberg 1899, S. 16]. Vgl. auch: „Was das Holz anbetrifft, so ist man bei uns darüber einig, dass ihm Recht geschieht, wenn es wegen seiner Vergänglichkeit und Feuergefährlichkeit beim Bau der für die Dauer berechneten Eisenbahn-Brücken grundsätzlich ausgeschlossen und auch für Strassenbrücken auf die Aussterbeliste gesetzt wird. (...) Selbst innerhalb der Grenzen seiner zur Zeit noch unangetasteten Herrschaft, auf dem Gebiete der Hilfs-Anlagen, hat sich sein Gegner, das Eisen, zunächst als freundlicher Mithelfer bereits eingefunden. Wie lange wird es dauern und das Holz spielt neben dem Eisen auch dort nur noch eine untergeordnete Rolle.“ [Mehrtens 1885, S. 473].

⁸ Zur Frage, warum die Baumeister des Altertums nicht mit Eisen bauten, antwortet der Ingenieur Georg Mehrtens: „Eisen und Stahl waren damals im Vergleich zu Holz und Stein zu kostbare Metalle, als daß man sie anders als zu den unentbehrlichen Dingen des Lebens, also für Waffen und Geräte, zu verwenden strebte. Zudem wurde das Eisen abseits von den großen Straßen des Verkehrs in einsamen Waldtälern und nur in geringen Mengen unmittelbar aus den Erzen erzeugt, war also umständlich zu gewinnen und zu beschaffen. Überdies fehlte es an passenden Werkzeugen, um die Eisenstücke in die notwendigen Formen und Verbindungen zu zwingen, während dies alles bei Holz und Stein in einfachster, natürlichster Weise zu lösen und zu bewerkstelligen war.“ [Mehrtens 1908, S. 52].

⁹ Vgl. beispielsweise „Für die Verarbeitung des schmiedbaren Eisens fehlte es immer noch an den geeigneten Werkzeugen und Maschinen, so daß der Wettbewerb von Holz und Stein erdrückend wirkte. (...) Es war deshalb für die damalige Zeit ein ungeheurer Gewinn, als die Einführung der Dampfkraft und der verkokten Steinkohle im Hochofenbetrieb die Verwendung des Gußeisens für Bauwerke aller Art ermöglichte.“ [Mehrtens 1908, S. 54].

¹⁰ In England ab dem Ausgang des 18. Jahrhunderts, in Deutschland verstärkt erst ab der Mitte des 19. Jahrhunderts [Mehrtens 1908, S. 56; S. 65].

¹¹ Das 19. Jahrhundert wurde/wird daher auch als das „Jahrhundert des Eisens“ bezeichnet [s. beispielsweise Mehrtens 1984, S. 2].

wurde eine Unzahl an eisernen Brückenbauten erstellt, dabei immer neue, optimiertere¹² Strukturen und Trägerformen entwickelt¹³ und damit die Spannweiten erhöht. Deutschland erzielte dabei eine gewisse Vormachtstellung in der Produktion des Eisens [Mehrtens 1908, S. 765]. Der deutsche Ingenieur Georg Mehrtens¹⁴ beschrieb Deutschland als vorbildlich für die technische Welt; weitgespannte Brücken seien zwar wegen fehlender Erfordernis hierzulande selten,¹⁵ dagegen bilde die Ausführung der Bauwerke in Bezug auf Sparsamkeit, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit verbunden mit ästhetischen Aspekten den hohen qualitativen Wert deutscher Eisenbrücken [Mehrtens 1908, S. 765–767].

Ein weiterer sehr wichtiger Aspekt, der diese Entwicklungen maßgeblich unterstützte, war die Ausbildung einer ingenieurwissenschaftlichen Tradition im Deutschland des 19. Jahrhunderts.¹⁶ Hierzu sei wiederum eine Aussage von Georg Mehrtens zitiert: *„Das 19. Jahrhundert ist ein ‚Jahrhundert der Technik‘, deren Grundsteine gelegt wurden in jener denkwürdigen Zeit, als Kohle und Eisen mit der Dampfkraft den Bund schlossen, als unter Führung der Chemie die metallurgischen Wissenschaften erwachten und als die ersten technischen Hochschulen gegründet wurden.“* [Mehrtens 1984, S. 2]. Diese technischen Wissenschaften haben im 19. Jahrhundert *„gegen Vorurtheile, Unkenntniss und hochmüthige Verkennung ihres Wesens und ihrer Bedeutung“* gekämpft [Mehrtens 1984, S. 2]. Zum Ende des Jahrhunderts sei die Tatsache der Ebenbürtigkeit dieser technischen Disziplinen mit den *„von alters her bevorzugten, an den Universitäten betriebenen Wissenschaften“* auch in Deutschland nicht mehr zu leugnen [Mehrtens 1984, S. 2]. Die Errungenschaften der Technik und das neue Selbstbewusstsein der Ingenieure zeigten sich dann auch in der (teilweise selbstherrlichen) Darstellung der Leistungen in den ab 1851 stattfindenden Weltausstellungen [Mehrtens 1984, S. 2]. Ein weiteres Zeichen dieser

¹² Um Baukosten zu verringern, sollten hohe Lasten mit möglichst geringem Materialeinsatz bzw. niedrigen Kosten über möglichst große Spannweiten geführt werden.

¹³ Vgl. hierzu beispielsweise die sehr ausführliche Abhandlung in [Mehrtens 1908].

¹⁴ Mehrtens verfasste um die Jahrhundertwende mehrere Artikel zur Geschichte des Brückenbaus, insbesondere des 19. Jahrhunderts, vgl. hierzu [Mehrtens 1898], [Mehrtens 1900] sowie [Mehrtens 1984]. Vermutlich wurde Mehrtens zum Verfassen dieser Publikationen veranlasst durch die Weltausstellung in Paris im Jahr 1900. Teilweise strahlen sie daher auch deutlich einen gewissen deutschen Nationalstolz aus, auch die passagenweise gewählte blumige Sprache muss vor diesem Hintergrund der Präsentation des deutschen Eisenbaus bei der Weltausstellung zurückhaltend bewertet werden.

¹⁵ Als Begründung dieser Aussage führt er hierzu eine Liste der zu jener Zeit weitestgespannten Brücken der Typen Hänge-, Bogen- und Auslegerbogen-, reine Balken- sowie Auslegerbücken an. Zusammenfassend erreicht Deutschland in dieser Aufstellung lediglich den siebten Platz, dennoch weisen die dort genannten deutschen Brücken mit der Ruhrorter Rheinbrücke bis zu 204 m Stützweite auf [Mehrtens 1908, S. 766].

¹⁶ Vgl. hierzu die Übersicht zur Entwicklung der Ingenieurwissenschaften im Bezug auf den Eisenbrückenbau im 19. Jahrhundert bei Mehrtens [Mehrtens 1984, S. 8–37]. Die Kunst, eiserne Brücken zu bauen, sei eine Errungenschaft der Technik des 19. Jahrhunderts und *„auch die Theorie der Brücken (...) darf als eine Frucht des 19. Jahrhunderts angesehen werden.“* [Mehrtens 1984, S. 8]. Und weiter: *„Mit der Vertiefung und Ausbreitung der Statik der Baukonstruktionen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts (...) schärfen sich zusehends die theoretischen Waffen. Die graphische Statik eröffnete neue Gebiete des Wissens; die Sätze vom Gleichgewicht und die Methoden zur Bestimmung der Spannkkräfte ebener und räumlicher Stabwerke erhielten dadurch ihre einfachste, vollendetste Fassung.“* [Mehrtens 1984, S. 8]. Im weiteren Verlauf nennt er einige Errungenschaften in der Statik, um dann zu resümieren: *„So verschaffte in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts die Theorie der Praxis die Mittel, um die älteren, ohne besondere theoretische Kenntnisse geschaffenen Systeme im Lichte der Wissenschaft mit neuem Gehalte zu erfüllen und zu neuen Formen umzumodeln.“* [Mehrtens 1984, S. 9].

erwachenden Ingenieurwissenschaft ist die Vielzahl an Publikationen und neu gegründeten Fachzeitschriften für das Bauwesen in diesem Zeitraum.

Die Entwicklungen in den Zeiten der Industrialisierung führten aber auch zu ganz wesentlichen Eingriffen in die Lebensbedingungen der Menschen.¹⁷ Arbeitskräfte zogen aus den ländlichen Gebieten in die Nähe der Produktionsstätten, was insbesondere die Städte nahezu explosionsartig vergrößerte.¹⁸ Dies zog wiederum den Bau ganzer Siedlungen sowie der notwendigen Infrastruktur und damit auch radikale Veränderungen des Lebensraumes und der Sozialstrukturen der Menschen nach sich.¹⁹ Diese Entwicklungen riefen auch Unbehagen in den Menschen hervor; um die Jahrhundertwende bildeten sich Heimatschutzbewegungen aus. Hans Roth beschrieb die Beweggründe in Bayern: „Nicht aus einer Fortschrittsfeindlichkeit (...) erwuchs die Heimatschutzbewegung. Sie entwickelte sich vielmehr aus der Einsicht, auf Beeinträchtigungen und Verluste und sich abzeichnende negative Auswirkungen auf die Natur- und Kulturlandschaft reagieren zu müssen.“ [Roth 2002, S. 9]. Seit den 1880er Jahren erwachte die Kritik an der zeitgenössischen Architektur.²⁰ Die Unzufriedenheit mit der Bautätigkeit bezog sich einerseits auf den sorglosen Umgang mit gewachsenen Orts- und Straßenbildern, andererseits aber auch auf häufig überdimensionierte Neubauten [Bommersbach 2002, S. 110].²¹

Vor diesem Hintergrund lässt sich auch die Renaissance des Massivbrückenbaus zum Ende des 19. Jahrhunderts besser verstehen. Zwar sah Georg Mehrtens noch 1908 die technische Überlegenheit des Eisenbrückenbaus gegenüber den Bauwerken aus Stein insbesondere darin, dass die Spannweite bei letzteren aufgrund des hohen Eigengewichtes beschränkt sei, während erstere zu dieser Zeit bereits Weiten von deutlich über 500 Metern²² aufwiesen [Mehrtens 1908, S. 172]. Jedoch stellt die Massivbogenbrücke in

¹⁷ Wiederum ist es Mehrtens, der zwar mit Begeisterung, dennoch aber mit einer herauszulesenden Sorge die Errungenschaften mit den Folgen eines Krieges vergleicht: „Wenn man die materielle Entwicklung des 19. Jahrhunderts rückblickend überschaubar, so erkennt man, wie ungemein viel rascher und tiefgreifender als im Anfange des Jahrhunderts die aus den Gedanken und Erfindungen entsprungenen Neuerungen und Umwälzungen sich heute vollziehen. Schlag auf Schlag folgen sich Erscheinungen und Ereignisse, in ihren Wirkungen den modernen Kriegen vergleichbar, die unter Aufbietung verheerender Machtmittel urplötzliche, vordem unerhörte Erfolge erzielen.“ [Mehrtens 1984, S. 2].

¹⁸ Vgl. die Zuwachsraten bayerischer Städte zwischen 1871 und 1910: München von knapp 170.000 auf 596.500; Augsburg von 83.000 auf 333.000; Nürnberg von über 51.000 auf 123.000. „Doch auch in mittleren und kleineren Städten erhöhte sich die Anzahl der Bewohner häufig auf das Doppelte, bei entsprechendem Arbeitsangebot auch auf ein Vielfaches.“ [Bommersbach 2002, S. 109].

¹⁹ Vgl. dazu die Beschreibung der Entwicklung in Bayern von Hans Roth: „Dieser Entwicklung standen Veränderungen innerhalb der bisher noch weitgehend intakten bäuerlichen Arbeits- und Lebenswelt gegenüber: die Abkehr von traditionellen Bindungen, die maßstabsprengenden Neubauten in dörflichen Siedlungen, der Einzug von Massenwaren in die Haushalte und nicht zuletzt schwerwiegende Eingriffe in die Naturlandschaft, was das Erscheinungsbild und den Erholungswert des ländlichen Raumes nachteilig beeinträchtigte.“ [Roth 2002, S. 9].

²⁰ Bereits 1880 empfahl Ernst Rudorff, Künstler und einer der Leitfiguren der Heimatschutzbewegung, dass man, um auch Arbeiterfamilien eine würdige Existenz zu sichern, städtische Anlagen weitläufiger gestalten solle. Statt der Mietskasernen solle man kleinere Häuser bauen und jedem Bewohner ein Stück Natur, und sei es in Form eines Gartens, in unmittelbarer Nähe zur Verfügung stellen [Bommersbach 2002, S. 110].

²¹ Rudorff bezeichnete dies als prahlerisch massige moderne Architektur, Spekulationswut, gedankenlose Sucht nach Neuerung und leerer Eleganz [Bommersbach 2002, S. 110].

²² Z. B. Brücke über den Firth of Forth (521 m) sowie die seinerzeit sich im Bau befindliche Brücke über den Lorenzstrom bei Quebec mit 548,63 m [Mehrtens 1908, S. 172].

architektonischer Hinsicht einen seit Jahrhunderten etablierten Bautyp dar, wenngleich auch hier die ingenieurtechnischen Fortschritte des 19. Jahrhunderts Einzug hielten. Bezüglich der Ästhetik wurde diese Konstruktionsart nun im Vergleich zu eisernen Brücken wieder als gefälliger empfunden. So schrieb beispielsweise Karl von Leibbrand, der Präsident der württembergischen Ministerial-Abteilung für den Straßen- und Wasserbau, hinsichtlich der Baustoffwahl beim Entwurf der Nagoldbrücke in Bad Teinach, dass *„in dem an Naturschönheiten reichen, ernste Tannenwälder und frische Wiesen in malerischer Abwechslung zeigenden Gebirgsthale der Nagold eine Brücke mit eisernem Oberbau, insbesondere bei der Anwendung der hier in Betracht kommenden Fachwerksconstructionen, in ästhetischer Beziehung einer Steinbrücke entschieden nachsteht.“* [Leibbrand 1883, S. 350].²³

Eiserne Brücken hatten zwar nach wie vor ihre Daseinsberechtigung, insbesondere bei spezifischen Randbedingungen, in denen steinerne Bauwerke nicht einsetzbar waren. Hier sind hauptsächlich zu nennen: eine beschränkte Bauhöhe, eine erforderliche sehr große Spannweite (z. B. bei breiten Wasserstraßen mit Schiffsverkehr), schwierige Konstruktionen (z. B. bei gekrümmten Grundrissen), bewegliche Brücken usw. [Landsberg 1899, S. 104–107]. Krone, königlicher Baurat aus Berlin, ergänzte in dem Manuskript zu einem Vortrag die Anwendung eiserner Überbauten bei sehr schlechten Baugrundverhältnissen, bei welchen das geringere Eigengewicht der Konstruktionen weniger Belastungen versprach [Krone 1898, o. S.].²⁴

Jedoch dämpften Materialprobleme die anfängliche Euphorie um den Baustoff Eisen. So beschrieb ein ungenannter Autor im Jahre 1899 die Hauptprobleme beim Eisenbau im Rosten des Eisens und in der Auswirkung der Vibrationen aus dem Schwerlastverkehr [N. N. 1899a, S. 369].²⁵ Der Rost sei ein angeborener und vergeblich bekämpfter Feind des Eisens. Kein Mittel könne seiner zerstörenden Einwirkung genügend Einhalt gebieten [N. N. 1899a, S. 369]. Bereits 1885 hatte Mehrtens das erkannte Phänomen sowie die Machtlosigkeit der Ingenieure ganz ähnlich beschrieben: *„Wir sehen das Eisen langsam aber sicher dem Zahn der Zeit verfallen. So sehr wir uns auch mühen, es durch schützende Ueberzüge dagegen zu verwahren, der Rost findet durch die feinsten Spalten dennoch seinen Weg und weiss selbst unter der schützenden Hülle sein Zerstörungswerk zu fördern.“* [Mehrtens 1885, S. 474]. Darüber hinaus begann man, sich über die Auswirkungen dynamischer Lasten Gedanken zu machen. So beschrieb der oben bereits erwähnte

²³ Vgl. auch die von Theodor Landsberg im Vorwort zu Karl von Leibbrands Monographie zu den gewölbten Brücken getroffene Aussage: „Eine Zeit lang schien es, als sollten die gewölbten Brücken durch die Eisenbrückenbauten ganz in den Hintergrund gedrängt werden; aber zur rechten Zeit erkannte man wieder die grossen Vorzüge der massiven Brücken sowohl hinsichtlich der ästhetischen Ausbildung, wie der Dauerhaftigkeit und leichten Unterhaltung.“ [Leibbrand 1897b, o. S.].

²⁴ Vgl. auch „Bei schlechtem Baugrund ist ein äusserlich statisch bestimmtes Tragwerk und noch besser ein solches ohne wagrechten Schub vorzuziehen, damit die Stabilität des Bauwerkes durch geringe Verschiebungen der Widerlager oder Pfeiler nicht beeinträchtigt wird. Massive Brücken sind also in solchen Fällen ungeeignet. Ferner ist bei wenig tragfähigem Baugrund ein leichtes Bauwerk einem schwereren, d. h. der leichte eiserne Ueberbau der Steinkonstruktion vorzuziehen.“ [Rohn 1910, S. 290].

²⁵ Vgl. auch: „Das Eisen, das sich hier ein Feld erobert hat, das ihm seiner Zersetzbarkeit sowohl als seiner molecularen Veränderlichkeit wegen nicht gebührt, würde in jene Grenzen zurückgedrängt werden, innerhalb welchen besondere Verhältnisse, wie die Nachgiebigkeit der Widerlager, ungenügende Constructionshöhen oder grosse Spannweiten das massive Bauwerk ausschliessen.“ [Huss 1884, S. 92].

ungenannte Autor, der Einfluss der Vibrationen²⁶ auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit eiserner Brücken könne zwar noch nicht sicher bestimmt werden, dennoch bestehe kein Zweifel, dass dieser von Nachteil sei: Eine Brücke aus Eisen erreiche im Augenblick ihrer Vollendung die höchste Stufe ihrer Sicherheit und von da ab nehme sie fortdauernd eine mehr und mehr tiefer liegende ein [N. N. 1899a, S. 369–370].²⁷ Die besprochene Wandlung der ästhetischen Wahrnehmung der Bauwerke wie auch die technischen Probleme führten dazu, dass nicht mehr „wahllos“²⁸ in jeder Situation eiserne Konstruktionen eingesetzt wurden.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der immer wieder eine wesentliche Triebfeder für bautechnische Fortschritte und Entwicklungen darstellt, ist die Wirtschaftlichkeit. Entscheidende Faktoren, die beim Brückenbau langfristig Einfluss auf die Kosten haben, sind neben den reinen Baukosten die Aufwendungen für den Unterhalt sowie die Dauerhaftigkeit des Bauwerks. Wie bereits beschrieben, war die Dauerhaftigkeit von Eisenbrücken begrenzt und wurde auch niedriger eingeschätzt als bei Massivbauten. Ebenso wurden die Kosten für den Unterhalt²⁹ bei den eisernen im Vergleich zu massiven Brücken wesentlich höher angesetzt.³⁰ Ein gewisser Regierungsbaumeister Stiehl sprach sich bezüglich der Dauerhaftigkeit und der Unterhaltskosten der Hauptbaustoffe im Brückenbau entsprechend aus: *„Die Dauer der Holzbrücken zu der der eisernen und massiven Brücken verhält sich etwa wie Jahrzehnt zu Jahrhundert zu Jahrtausend, die Unterhaltungskosten stehen in einem fallenden Verhältniss, die massiven Brücken erwähnter Konstruktion sind in den Kosten unerheblich theurer als Holzbrücken und 15 bis 30 % billiger als eiserne Brücken.“* [N. N. 1881b, S. 208].³¹

²⁶ Vgl. auch: „Dabei stehen wir der nicht minder wichtigen Frage, ob und in welchem Masse die regelmässig wiederkehrenden Erschütterungen im Laufe der Zeit auf die Festigkeit des Materials einen nachtheiligen Einfluss äussern werden, noch ziemlich rathlos gegenüber. Wir haben darüber bei der Neuheit der Sache keine ausreichenden Erfahrungen sammeln können.“ [Mehrtens 1885, S. 474]. Ähnliche Aussagen beispielsweise bei [Pontzen 1875, S. 282], [Hoffmann 1878a, S. 7] usw.

²⁷ Vgl. auch die ähnlich lautende Aussage Hoffmanns, der den Verfall bis hin zu fehlender Sicherheit, also zum Einsturz einschließlich der dadurch erforderten Opfer an Menschenleben und finanzieller Art beschreibt [Hoffmann 1878a, S. 7].

²⁸ Vgl. beispielsweise „Im Drange der Entwicklung der Eisenbahnen hat bei manchen Brückenbauten das Eisen statt des Steins ohne technischen oder wirtschaftlichen Vorteil Verwendung gefunden.“ [Rohn 1910, S. 289]. Sowie „Nachdem (...) vor einem halben Jahrhundert das Eisen als Brückenbaustoff beinahe verdrängt hatte und auch manche Bauwerke unzweckmässigerweise aus Eisen erstellt wurden, besteht heute das entgegengesetzte Bestreben, nämlich eiserne Brücken nur noch dort zu bauen, wo die Herstellung von steinernen Brücken aus rein technischen Gründen ausgeschlossen ist.“ [Rohn 1910, S. 289].

²⁹ Vgl. die Aussage des Berliner Professors Dietrich, der die Eisenkonstruktion zwar als für das Auge des Ingenieurs interessanter bezeichnet; man solle jedoch nicht vergessen, dass diese „den Keim des Vergehens in ungleich höherem Maße als eine Steinkonstruktion in sich birgt, daß nur die sorgsamste Behandlung, d. h. eine genaue Revision aller Theile in kurzen Zeitperioden, die Beseitigung aller Rostflecke, die Erneuerung aller Kittstellen und des ganzen Anstrichs sie vor schneller Zerstörung zu schützen vermag.“ [Dietrich 1882, S. 78].

³⁰ Eine grobe Einschätzung gibt das Handbuch der Ingenieurwissenschaften: Dort wird für den Unterhalt des Unterbaus einer Bahnlinie bei Einsatz gewölbter Brücken 5,4 % der Baukosten kalkuliert, während hölzerne mit 7,0 % und eiserne mit 12,4 % angesetzt werden [Schäffer, Sonne 1886, S. 371]. Eine direkte Vergleichbarkeit ist jedoch aufgrund verschiedener Baukosten nur eingeschränkt möglich.

³¹ Im Rahmen des Entwurfs der Nagoldbrücke in Bad Teinach (Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü3) gab auch Karl von Leibbrand als weiteren Beweggrund für die Wahl der Massivbrücke an, „dass endlich die letztere einer eisernen Brücke bezüglich der Unterhaltungskosten und der Dauer unbedingt vorzuziehen ist.“ [Leibbrand 1883, S. 350].

Was also Ästhetik, Dauerhaftigkeit und Unterhaltskosten betraf, so waren die Vorteile der Massivbrücken anerkannt. Bleibt noch die Betrachtung der Baukosten. Die Herstellung einer Werksteinbrücke ist mit hohem Aufwand verbunden,³² oft auch dadurch bedingt, dass kein geeignetes Material vor Ort vorhanden ist. Des Weiteren benötigt man gut ausgebildete Steinmetze, die das Material in die für den Bau eines unter Umständen sogar schiefen Gewölbes recht komplizierten Formen bringen können. Weiterhin erfordert die Handhabung der Steinblöcke eine hohe Sorgfalt und auch einen beträchtlichen Transportaufwand.³³ Seitdem kleinere Steine, verbunden mit einer beträchtlichen Menge an Mörtel, für Brückengewölbe verwendet wurden, verringerten sich die Kosten für gewölbte Brücken, insbesondere dann, wenn geeigneter Sand und Kies vor Ort vorhanden waren.³⁴ Dabei blieb anfänglich jedoch noch die Skepsis über die Eignung dieser Bauart, was insbesondere mit der Güte des Mörtels zusammenhing. Mit dem Aufkommen des Portlandzementes und dessen ständiger Qualitätsverbesserung konnten diese Zweifel jedoch ausgeräumt werden.³⁵ So rief Anton Hoch, Direktor der Zementfabriken in Blaubeuren, Allmendingen und Ehingen, in einem Vortrag im Rahmen der Verhandlungen des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten im Jahr 1894 auf: *„Nur dann, m. H., wenn wir dem Beton die Festigkeit des natürlichen Steines geben, nur dann wird dem Cement im Brückenbau ein weiteres Feld für seine Verwendung geschaffen, von dessen Grösse und Ausdehnung wir noch gar keine Ahnung haben.“* [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 110]. Bereits ein Jahr später, an gleicher Stelle, verkündete er, dass *„der Beweis geliefert worden [sei, Erg. d. Verf.], dass wir dem Beton die Festigkeit des natürlichen Steines geben können, und ich glaube daher, dass es nicht mehr lange dauern wird, bis auch allgemein die Ueberzeugung Platz greift, dass für Brückenbauten da, wo Cement und Sand zur Verfügung stehen und die Höhenverhältnisse es gestatten, Massivbau auszuführen, einzig und allein der Cementbau angewendet wird.“* [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1895, S. 136].³⁶

Zum Ende des 19. Jahrhunderts, als sich das Bauen von gewölbten Brücken mit mehr oder weniger kleinen Steinen etabliert hatte, wurde der Massivbau nun häufig den

³² Vgl. beispielsweise die Aussage E. H. Hoffmanns, der in seinem Buch „Eisen, Holz und Stein im Brückenbau“ den Inhalt früherer Abhandlungen zum Brückenbau zusammenfasste, „dass die Steinverwendung im Allgemeinen, selbst unter Berücksichtigung der grössern Dauer, so theuer zu erachten sei, um von ihr nur in besonders wichtigen und günstigen Fällen Gebrauch machen zu können.“ [Hoffmann 1878a, S. 1]. Vgl. auch [N. N. 1899a, S. 369].

³³ Beispielsweise das Einbringen von Wolfslöchern usw.

³⁴ Vertiefende Betrachtungen zur Entwicklung und Ausführung der Bautechnik vgl. Kap. 3 und 4.

³⁵ Ausführliche Betrachtung in [Mehrtens 1885]. Zur historischen Entwicklung des Materials Beton vgl. Kap. 3.2.3.

³⁶ Vgl. „Wenn sich zur rationellen Konstruktion als zweites Hauptforderniss eine tadellose Ausführung gesellt, so darf man zu der erwähnten Bauausführung das grösste Vertrauen haben und ihr dieselbe Dauer wie dem Quaderbau zuschreiben.“ [N. N. 1881b, S. 208]. Vgl. „Wir sind überzeugt, dass, bei richtiger Dimensionierung, der Cementbeton im Brückenbau hinsichtlich der Kosten mit natürlichen Hausteinen sowohl, als mit Eisenconstruktionen zu concurriren vermag und dass derselbe als Brückenbaumaterial für kleinere Spannweiten in Zukunft eine immer mehr bevorzugte Stelle einnehmen wird, sofern sich hiefür, wie diess z. B. für Eisenconstruktionen der Fall ist, in gleicher Weise Unternehmer als Spezialisten ausbilden.“ [N. N. 1884b].

Ausführungen in Eisen vorgezogen.³⁷ Die Euphorie verschob sich vom Eisen- zum Massivbrückenbau.³⁸

2.2 Definitionen und Begriffe

„Was versteht man im allgemeinen unter Beton? Welche Frage! – sagt gewiss mancher und denkt dabei: ‚etwas Einfacheres zu lösen, gibt es nicht‘ (...).“ [N. N. 1899c, S. 256].

Die genaue Definition der Materialien zum Massivbrückenbau bietet einige Schwierigkeiten. Für eine Begriffsabgrenzung sollen zunächst die gebräuchlichsten Baustoffe vorgestellt werden.

Bis ins 18. Jahrhundert wurden Gewölbe vorwiegend aus konventionellem Mauerwerk mit natürlichen oder künstlichen Steinen erstellt. Diese mussten über eine ausreichende Druckfestigkeit verfügen, wurden lagerhaft vermauert und mit Mörtel verbunden. Bei den künstlichen Steinen wurden insbesondere Backsteine verarbeitet. Diese hatten eine einheitliche Form. Um ein Gewölbe zu bauen, musste daher der Mörtel den Gewölbeverlauf angleichen. Zum Mauerwerk mit natürlichen Steinen sind vorwiegend Werksteine und Bruchsteine verwendet worden. Werksteine wurden dabei meist so bearbeitet, dass sich Lager- und Stoßfugen dem Gewölbeverlauf anpassten (Keilsteine) und der Mörtelanteil damit sehr gering war. Dies erforderte einen hohen Aufwand und damit hohe Kosten.³⁹ Bruchsteingewölbe wurden aus möglichst lagerhaften Steinen, welche nur geringfügig behauen wurden, im Verband vermauert, so dass sich mehr oder weniger durchgehende Schichten bildeten [Heinzerling 1891, S. 50]. Eine Variante stellt hierbei das Bruchsteingewölbe mit ausgegossenen Fugen dar: Dabei werden die Bruchsteine auf der Bogenschalung in mehreren Lagen ausgebracht und mit

³⁷ Vgl. „Es ist darum höchst wahrscheinlich, dass diese Bauweise in steinarmen Gegenden eine Zukunft besitzt und den Holzbau verdrängen wird; in Fällen, wo nicht überaus beschränkte Höhe den Eisenbau zur Nothwendigkeit macht, auch diesen.“ [Büsing 1892, S. 252] sowie „Für Brücken ist eine sorgfältige Wölbung von guten, natürlichen oder künstlichen Steinen oder Beton jeder anderen Bauart vorzuziehen, wenn nicht besondere Gründe eiserne Brücken vorteilhafter erscheinen lassen.“ [Landsberg 1899, S. 107]. Vgl. auch: „Die Vorzüge des Eisens als Baustoff, zu welchen in gegenwärtiger Zeit noch dessen niedriger Preis hinzutritt, haben den Steinbau wohl zurückzudrängen, den Werth dieser Bauart jedoch in keiner Weise zu schmälern vermocht. Wir finden im Gegentheil in neuester Zeit das Bestreben vieler Baumeister dahin gerichtet, dem Steinbau den ihm besonders in künstlerischer Beziehung gebührenden Vorrang überall da wieder zu verschaffen, wo seine Ausführung nicht infolge constructiver Rücksichten von vornherein ausgeschlossen ist. Auch aus volkswirtschaftlichen Gründen empfiehlt sich der Steinbau theils wegen seiner grossen Dauer, theils deshalb, weil bei gleichen Baukosten ein Steinbau meistens einer erheblich grösseren Zahl von Arbeitern lohnenden Verdienst zu gewähren pflegt als die Ausführung einer Eisenconstruction. In dem Wettkampf mit dem Eisen kann der Steinbau sich jedoch nur dann behaupten, wenn man sich bei seiner Ausführung aller der Hilfsmittel bedient, welche die neuere Technik an die Hand giebt.“ [Rheinhard 1887, S. 325].

³⁸ Vgl. „Mögen die neueren deutschen Flachbrücken dazu beitragen, daß das Urtheil, die Franzosen überträfen im Brückenbau von jeher die Deutschen in Schönheit und Leichtigkeit, während die deutschen Brücken schwerfällig seien, ihre Richtigkeit verliert.“ [Leibbrand 1906c, S. 465].

³⁹ Vgl. „Bedenkt man, welche Arbeitsleistung und welche Kosten erforderlich sind für das Bearbeiten der Quader bei Quaderbrücken, welche Hebe- und Versetzvorrichtungen nöthig und welche Kosten mit dem langwierigen Versetzen der Bogenquader verbunden sind, so ist es einleuchtend, dass durch Anwendung von unbearbeiteten Bruchsteinen und Cementmörtel zum Bogenmauerwerk eine bedeutende Kostenersparnis erzielt werden muss. Die Bearbeitung der Steine fällt ganz fort, der Transport wird leichter, also billiger, das Versetzen ein einfacheres, mithin weniger Zeit und Kosten beanspruchendes, obwohl die Steine sorgfältig radial und mit vollen Fugen in Cementmörtel versetzt werden, was gewissenhafteste Arbeit erfordert.“ [Liebold o. J. (ca. 1892), S. 2].

dünnflüssigem Mörtel vergossen bis die Fugen vollständig verfüllt sind [Heinzerling 1891, S. 50].

Der Übergang zum Beton wird durch die Aufgabe des Verbandes und der Regelmäßigkeit des verwendeten Steinmaterials eingeläutet.⁴⁰ Dementsprechend lautet eine Definition Friedrich Wilhelm Büsings in seiner Monographie zum Portland-Zement aus dem Jahre 1892: „Beton (...) kann man als ‚Mauerwerk aus ungeformten Massen‘ erklären, insofern, als das den Hauptteil bildende Steinmaterial in allen seinen Grössen: vom noch nicht erbsengrossen Kieskorn bis hinauf zu dem eben noch ‚handlichen‘ Findling oder dem Felsstück verwendet wird, ohne dass dasselbe zuvor eine Bearbeitung erfährt, welche auf einen gewissen höhern Grad von Uebereinstimmung in Gestalt und Grösse der Stücke hinausgeht, und als deshalb auch keine Regelmässigkeit in dem ‚Nebeneinander‘ des Steinmaterials besteht.“ [Büsing 1892, S. 71]. Durch die Verwendung von kleinen Steinen unterschiedlicher Größen und Formen verliert der Stein die Funktion des hauptsächlich tragenden Baustoffs, der Mörtel bzw. das dort enthaltene Bindemittel gewinnt an Wichtigkeit.⁴¹

Wurde anfänglich noch reiner Kalk als Bindemittel verwendet,⁴² ermöglichte die schnellere Erhärtung von hydraulischen Bindemitteln einen Fortschritt in der Bauweise.⁴³ So wurden zunächst verschiedene Arten hydraulischer Bindemittel eingesetzt. Eine „Definition“ aus dem Jahre 1899 beschreibt, Beton sei ein durch „eine Masse“ verbundenes Konglomerat. Dabei sei es gleichgültig, „ob diese Masse (Bindemittel) aus Bitumen, Kalke, Trasse oder aus künstlichen Zusammensetzungen (wie der Cement) besteht, den damit gebildeten Baukörper nennt man Beton. Somit ist bezüglich der Bindemittel nicht Bedingung, dass Cement allein dasselbe vertrete, und gleicherweise können auch selbstverständlich die in Frage kommenden Konglomerate gänzlich verschiedenen Ursprungs sein.“ [N. N. 1899c, S. 256]. Dennoch setzte sich letztlich der Portland-Zement aufgrund seiner verschiedenen Vorteile als Bindemittel durch: schnelle Erhärtung, hohe Festigkeit und – nach einer Einführungsphase – auch hohe Verlässlichkeit der Produkte, deren Eigenschaften während der künstlichen Herstellung kontrolliert eingestellt werden konnten.

Mit der Kleinteiligkeit des Steinmaterials und der Verwendung des Zementes entsteht der Zementbau. Dieser wiederum unterteilt sich in die Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise sowie den reinen Betonbau.

⁴⁰ Vgl. „Zwischen dem eigentlichen Gewölbe-Mauerwerk und dem Beton-Gewölbe bestehen Uebergangsformen. Von dem Quader- und Ziegelmauerwerk etwa gleich weit entfernt ist das Gewölbe aus lagerhaften Bruchsteinen, zwischen welchem und dem Beton-Gewölbe diejenige Form steht, bei der man die ‚Schichtung‘ aufgibt und die Steine unter Verwendung von viel Mörtel unregelmässig zusammenpackt, sie in den Mörtel eindrückt oder eintreibt und später abgleicht.“ [Büsing 1892, S. 252].

⁴¹ Vgl. „Der Bétonbau ist seinem ganzen Wesen nach kein Steinbau im gewöhnlichen Sinne, sondern ein Mörtelbau, dessen Dauer und Festigkeit ausschliesslich durch die vorzüglichen Eigenschaften des dazu benutzten Mörtelmaterials, des durch seine Bindekraft, Erhärtungs- resp. Verkittungsfähigkeit und große Festigkeit bekannten Portland-Cementes gesichert ist. Beim Steinbau beruht die Festigkeit der einzelnen Constructionen auf der richtigen statischen Lagerung der Steinarten und dem regelrechten Verbande derselben.“ [Liebold 1880, S. 3] oder „(...) die Gewölbe aus sehr kleinen unregelmässigen Bruchsteinen, deren Standfähigkeit und Festigkeit wesentlich auf dem kräftigen, zur Anwendung gekommenen Mörtel beruht (...)“ [Barkhausen 1892, S. 321].

⁴² Vgl. Kap. 3.2.2.

⁴³ Vgl. Kap. 3.2.3.

Die sogenannte Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise wurde in erster Linie von Bernhard Liebold angewandt.⁴⁴ Dabei wird eine Schicht Mörtel auf der Schalung ausgebreitet.⁴⁵ In diesen Mörtel werden Kopfsteine, deren Größe oft nur ein Viertel der Gewölbesterke erreicht, eingetrieben [Schwering, Schlierholz 1881, S. 522]. Nachweisbar ist auch plattiges Material, das in radialer Richtung in die Mörtelschicht eingedrückt wurde.⁴⁶ Die noch fehlende Bogenstärke wird mit einem Zementmörtel ergänzt, in welchen dann kleinere oder größere Steine eingebracht werden [Schwering, Schlierholz 1881, S. 522]. Wie geordnet diese zweite Lage ausgeführt wurde, kann nicht gesichert festgestellt werden.⁴⁷

Beim Betonbau hingegen wurden vor dem Einbau sämtliche Bestandteile fertig gemischt und in diesem Zustand ohne Rücksicht auf eine Ausrichtung der Zuschläge auf bzw. in die Schalung eingebracht. Auch hier gibt es wiederum einige Unterarten, wie beispielsweise Schütt- oder Gussbeton. Da diese aber im Brückenbau von untergeordneter Bedeutung sind,⁴⁸ werden diese weicheren Betonarten nicht näher betrachtet. Ein weiteres, wesentliches – hier namensgebendes – Merkmal des Stampfbetons ist die Verdichtung des Baustoffs mit Stampfern, wodurch der Beton Festigkeit und Dichtigkeit erhielt.⁴⁹ Weiterhin wird in vorliegender Arbeit unter Stampfbeton ein Bauteil mit tragender Funktion verstanden; Putze, Estriche, Kunstgegenstände aus Beton und vieles mehr wurden vielfach beschrieben, werden aber aufgrund der völlig verschiedenen Anforderungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit außen vor gelassen.

Die vorgehenden Überlegungen führen zu folgender Definition für Stampfbeton im ganz engen Sinne vorliegender Arbeit: Stampfbeton ist ein Gemisch aus einem hydraulischen Bindemittel, kleinteiligen Steinmaterialien sowie einer gewissen Menge Wasser, das in

⁴⁴ Vgl. beispielsweise „(...) die Bruchstein-Cementbauweise, die von der Firma Liebold u. Co. als Eigenart ausgebildet ist.“ [Winter 1894, S. 439]. Weiterhin: Firma Liebold hat seinerzeit „als erste in Deutschland, eine Sonderheit der Ausführung aufgenommen, die man als ein Mittelding zwischen dem Steinbau und der Stampfbeton-Herstellung betrachten kann, die Ausführung in ‚Bruchstein-Füllmauerwerk‘. Da ein regelrechter Verband der kleinen Bruchsteine hierbei nicht mehr besteht, so beruht die Festigkeit solcher Konstruktionen vorwiegend auf derjenigen des Zementmörtels.“ [Fr. E. 1902b, S. 436–437].

⁴⁵ Vgl. auch die Beschreibung der Lennebrücke in Vorwohle in Kap. 4.5 und [Liebold 1877a] sowie „Bei Bruchsteingewölbem, deren Herstellung besonders die Firma Liebold sehr gefördert hat, werden die rauhen Bruchsteine in sattes Mörtelbett verlegt“ [Leibbrand 1906a, S. 612].

⁴⁶ Vgl. Muldebrücke in Göhren (Abbildung 2.1; Beschreibung im Katalog unter Sa12) oder die Lennebrücke in Vorwohle (s. Fußnote 45; Beschreibung im Katalog unter D7) oder die schiefe Brücke von Liebold bei Potschappel/Dresden: „Das Gewölbemauerwerk besteht aus sogen. Konkret-Mauerwerk (System Liebold) d. h. aus ausgesuchten plattenförmigen Steinen, welche in einem reichlichen Mörtelbette senkrecht zur Drucklinie vermauert werden.“ [Schmidt 1908, S. 442].

⁴⁷ Z. B. spricht Schwering von „möglichst regelrecht und im Verbande mit dem Hammer eingetrieben“ [Schwering, Schlierholz 1881, S. 522]. Die Abbildung der Muldebrücke Göhren (Abbildung 2.1) zeigt dieses geordnete Bild. Die Beschreibung der Vorwohler Lennebrücke spricht dagegen von „einer zweiten Mörtellage, bei welcher Kalksteinstücke kleinerer Art als Einlagen benutzt wurden.“ [Liebold 1877a, S. 259].

⁴⁸ Vgl. z. B. „Nur mit solchem Stampfbeton erzielt man grosse Dichtigkeit und ausserordentlich hohe Festigkeit, während der sog. Gussbeton (aus breiigem Mörtel) in Folge der geringeren Dichte eine weit geringere Festigkeit ergibt. Man sollte deshalb das Gussverfahren womöglich ganz vermeiden.“ [Deutsches Museum Archiv, Sign. FA 010, Bü 271 (1896), S. 7] oder die Aussage eines Herrn Jähnikke, Schüttnbeton werde vorwiegend zu Gründungen unter Wasser verwendet; aus Gussbeton seien hauptsächlich Gegenstände wie Tröge, Futterkrippen, Röhren usw. gefertigt worden [Jähnikke 1903, S. 1496–1497].

⁴⁹ Vgl. Kap. 5.3.

fertiger Mischung regellos auf bzw. in eine Schalung gebracht und verdichtet wird und im Endzustand eine baustatisch relevante Funktion übernimmt.

Auch wenn die Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise dieser ganz engen Definition nicht vollständig entspricht,⁵⁰ werden im Rahmen vorliegender Arbeit als Betonbrücken solche bezeichnet, die den letzten beiden Bauweisen zugesprochen werden können, also dem reinen Betonbau wie auch der Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise. Auch bauzeitlich wurde dies so gesehen, wie die Aussage Friedrich Heinzerlings von 1891 zeigt: „*Gewölbe aus Cementbeton. Diese Gewölbe werden entweder so ausgeführt, dass man eine Lage Cementmörtel auf einer Verschalung ausbreitet und sodann Bruchsteine in dieselbe eindrückt oder dass man den Cementmörtel vorher mit Steinbrocken vermengt und dann auf die Verschalung ausgiesst.*“ [Heinzerling 1891, S. 50]. Auch ein gewisser Paul Winter bezeichnete die Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise im Jahr 1894 lediglich als eine Abart des Betonbaus.⁵¹ Ob nun ein Brückenbogen in Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise oder mit Stampfbeton ausgeführt wurde, hing gemäß Bernhard Liebold in erster Linie von den verfügbaren Materialien und damit von den Kosten ab.⁵² Dagegen betonte Georg Mehrstens die technische Überlegenheit des Stampfbetons hinsichtlich dessen höherer Festigkeit gegenüber der Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise [Mehrstens 1908, S. 758]. Welche der Bauweisen angewandt wurde, entschieden letztlich die Randbedingungen, was an der Betrachtung der beiden Lieboldschen Brücken in Lautrach und Plauen deutlich wird. Beide wurden nahezu zeitgleich von derselben Firma mit großen Spannweiten erbaut, trotzdem wurde die eine in Stampfbeton, die andere in Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise erstellt.⁵³

⁵⁰ In Bezug auf die fertige Mischung sowie die Verdichtung.

⁵¹ Vgl. beispielsweise: „Bemerkenswerth an ihr ist die Verwendung unbearbeiteten und selbst ganz unlagerhaften Bruchsteins mit vorzüglichem Cementmörtel. Die Bauweise kann daher wohl nur als eine Abart des Betonbaues angesehen werden, aber auch als eine unter Umständen sehr zweckmässige.“ [Winter 1894, S. 439].

⁵² Für die Wahl des Baumaterials waren die Kosten maßgebend, falls keine besonderen Rahmenbedingungen vorlagen [Barkhausen 1892, S. 253]. Zu den Kosten von Beton bzw. Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise vgl. die Aussage Liebolds, beim Bogenmauerwerk seien die Kosten von Stampfbeton etwa 7 % über denjenigen der Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise [Winter 1894, S. 439]. Die Kosten einer Bruchstein-Zementmörtel-Brücke seien nur dort höher als bei einer Stampfbetonbrücke, „wo kein Bruchstein oder doch nur sehr theurer zur Verfügung steht, dagegen guter Kies oder Ziegelbruch billig zu haben ist.“ [Winter 1894, S. 439]. Und weiter „Da nun meiner Ansicht nach gegen letzteres [Bruchstein-Zementmauerwerk, Erg. d. Verf.] nicht mehr, oder richtiger ebensowenig grundsätzliche Bedenken vorliegen können, wie gegen den Stampfbetonbau, so dürfte für die Wahl der einen oder anderen Bauweise nur eine die jedesmaligen örtlichen Verhältnisse berücksichtigende vergleichende Kostenberechnung massgebend sein.“ [Winter 1894, S. 439].

⁵³ Lautrach: Stampfbeton, 1903–1904, Lichtweite 59 m, Beschreibung im Katalog unter BY10. Plauen: Bruchstein-Zement, 1903–1904, Lichtweite 90 m, Beschreibung im Katalog unter Sa20.

3 BETON

Bei der Betrachtung der Frage, seit wann der Beton im Hoch- und in der Folge auch im Brückenbau verwendet wird, muss man zwei voneinander unabhängig laufende Entwicklungsstränge untersuchen: einerseits die Verwendung des Materials Beton als fertiges Gemisch von Sand, Kies und einem hydraulischen Bindemittel unter Beimischung einer gewissen Menge an Wasser, andererseits die Bautechnik, mittels Schalung und Verdichtung ein monolithisches Bauteil herzustellen. Erst die Zusammenführung beider Entwicklungen führte zum Stampfbeton. Im Folgenden werden beide Stränge beleuchtet.

3.1 Das Material Beton: Die Anfänge im Wasserbau

„In Frankreich wird schon gar lange bei Gebäuden, welche in den Ocean kommen, und zu dergleichen versenkter Mauererei ein Mörtel gebraucht, welcher sehr hart wird, und aus nachfolgenden Materialien zusammen gesetzt ist: Pozzolane, Sand, Ziegeln, Hammerschlag, ungelöschter Kalk und Mauersteine. Die Franzosen nennen diese Masse Beton.“ [Wahl 1786, S. 111].

Die Wurzeln des modernen Konstruktionsbetons⁵⁴ reichen weit zurück.⁵⁵ Als Vorläufer des modernen Betons gilt gemeinhin die Verwendung des Opus Caementitium, des römischen Betons. Diese bei antiken Bauwerken angewandte Bauweise besteht in der Nutzung eines hydraulischen Mörtels aus Sand und Luftkalk mit Zusätzen von Puzzolanen. Durch die Verwendung hydraulischer Bindemittel erhielt der Mörtel seine charakteristischen Eigenschaften: Erhärtung auch ohne Luftzutritt (z. B. unter Wasser oder bei großen Bauteilstärken), im Vergleich zum Luftkalk schnellere Erhärtung sowie höhere Festigkeit. Dieser Mörtel wurde abwechselnd mit Bruchsteinen schichtenweise in Schalungen eingebracht. Der Unterschied zum heutigen Verständnis des Materials Beton liegt in der schichtenweisen Verarbeitung: Moderner Beton wird fertig gemischt, also regellos, in die Schalung eingebracht.⁵⁶

Wann jedoch Beton im heutigen Sinne erstmals eingesetzt wurde, lässt sich wohl aus heutiger Sicht nicht mehr nachweisen. Eine kontinuierliche Entwicklung im Wasserbau ist bei Molen ab dem Ende des 17.,⁵⁷ bei der Erstellung von Schleusen ab dem frühen 19. Jahrhundert belegbar.⁵⁸ Und auch die Verwendung von Beton in Fundierungen ist zu dieser Zeit bereits vielfach nachgewiesen. Eine der wichtigsten, sehr frühen Quellen hierzu ist die *„Architecture hydraulique“* von Bernard Forest de Bélidor [Bélidor 1737–1753]. In

⁵⁴ Die wiederholt aufgestellte Behauptung, bei Bélidor lasse sich der Begriff „Beton“ erstmals nachweisen, ist falsch. Zwar verweist Holzer in seinem Artikel auf eine Definition in Richelets Französisch-Wörterbuch von 1732 [Holzer 2014a, S. 886], das Altfranzösische Wörterbuch von Tobler/Lommatzsch nennt jedoch eine Urkunde aus dem 14. Jahrhundert aus Dijon als Quelle [Tobler, Lommatzsch 1925–2002, Bd. 1, Stichwort „betun (ndf. béton)“].

⁵⁵ Zur Vorgeschichte des modernen Konstruktionsbetons vgl. vierteilige Artikelserie [Holzer 2014a]; [Holzer 2015], [Veihelmann 2015c]; [Holzer, Veihelmann 2015], wobei die Schwerpunkte des dritten und vierten Teils insbesondere in Kap. 3.2 bzw. 4 vertieft werden. Weiterhin zur Verwendung des Materials Beton im Wasserbau: [Holzer 2014c]; [Holzer 2014b].

⁵⁶ Vgl. Kap. 2.2.

⁵⁷ Vgl. [Holzer 2014a].

⁵⁸ Vgl. [Holzer 2015].

diesem Werk beschreibt Bélidor auch ausführlich Gründungen aus Beton: *„Wie bey dem Grundlegen unter dem Wasser, wobey man keine Umdämmungen und kein Ausschöpfen anwendet, der Mörtel, Beton genannt, gebraucht wird.“* [Bélidor 1737–1753, Bd. 4, S. 178].⁵⁹ Dazu werde ein unten offener hölzerner Kasten gebaut, versenkt und mit Betonmörtel schichtweise gefüllt.⁶⁰ Zu großer Bekanntheit gelangte die von Louis-Joseph Vicat erbaute Brücke von Souillac (1812–1824). Wie bei Bélidor beschrieb auch Vicat die Ausbildung unten offener Holzkästen. Sein Beton bestand aus stark hydraulischem Kalk, Sand und Kies. Den Kalk habe man auf der Baustelle gebrannt. Den Beton habe man schichtweise eingebracht und leicht festgedrückt [Brisson 1826, o. S.].

Im deutschsprachigen Raum ist es der ungarische Ingenieur Johann von Mihálik, der im Jahr 1858 eine Monographie zum Betonbau veröffentlichte und darin alle Zweige des Bauwesens behandelte. Den wesentlichen Vorteil des Betons sah Mihálik beim Wasserbau: Dort gewähre er im Vergleich mit den anderen üblichen Bauweisen insbesondere in Bezug auf Zeit- und Kostenersparnisse besondere Vorteile. Zu diesen gehöre vor Allem, *„dass die Nothwendigkeit wegfällt, die Baugrube, in welcher ein Werk ausgeführt werden soll, vorerst mit kostspieligen Fangdämmen einzuschliessen, und den inneren Raum auszuschöpfen; indem man vielmehr diesen mit Wasser gefüllt lassen muss, um hierin das Béton-Mauerwerk in Ausführung zu bringen.“* [Mihálik 1858, S. 7]. Im Jahr 1854 baute er die erste komplett aus Beton bestehende Franz-Josefs-Schleuse. Sie befindet sich am Anschluss des Verbindungskanals Donau-Theiss an die Donau bei Bezdan.⁶¹ Er beschrieb dieses Bauwerk in seiner Monographie: *„Ueber den Bau der k. Franz-Josef-Schiffahrts-Schleuse kommt im Allgemeinen zu erwähnen, dass sie ganz aus Béton, und zwar in einem Umfange und einer Bauweise zur Ausführung gekommen ist, wie es bis jetzt noch bei keinem Objekte in ähnlicher Art der Fall war.“* [Mihálik 1858, S. 324; Abbildung 3.1]. Mihálik hatte bei dem Untergrund aus Wellsand ein kontinuierliches Aufquellen, also Nachströmen des Sandes befürchtet. Er stellte die Schleuse daher ohne vorherige Ausführung von Fangdämmen und größtenteils unter Wasser monolithisch aus Beton her. Sie bilde *„ein Becken, dessen Boden und Wände aus einem einzigen Stücke bestehen.“* [Mihálik 1858, S. 325]. 90 Tage nach Beginn der Betonarbeiten wurde die Schleuse fertiggestellt. In dieser Zeit war rund um die Uhr gearbeitet und eine Betonmasse von 600.000 Kubikfuß hergestellt und eingebracht worden [Mihálik 1858, S. 325; S. 348]. Sein Fazit war positiv: *„Seit dem nun fünfjährigen Bestand dieses, allen atmosphärischen Einwirkungen Preis gegebenen Bauwerkes, ist an demselben, ausser einer steten Zunahme der Versteinerung, keine Veränderung wahrnehmbar.“* [Mihálik 1858, S. 364]. Beim Bau von Brücken konnte also auf eine langjährige Erfahrung im Umgang mit dem Baustoff Beton, insbesondere bei Gründungen und im Wasserbau, zurückgegriffen werden.

⁵⁹ Aus der deutschen Übersetzung, Bd. 4, 9. Ausgabe, Zweyter Theil, Zehntes Capitel, Zweyter Abschnitt, S. 14 (Augsburg: Kletts 1770). Original: *„De la maniere d'employer le Beton pour les Fondations faites au fond de l'eau sans batardeaux ni épuisemens.“*

⁶⁰ Weitere Ausführungen beschreiben beispielsweise Kahlow und Güntheroth im Zusammenhang mit Johann August Röblings Mitschrieb einer Brückenbau-Vorlesung bei Johann Friedrich Wilhelm Dietlein [Güntheroth, Kahlow 2006, S. 63–64].

⁶¹ Heute Serbien; nahe dem Dreiländereck Ungarn-Kroatien-Serbien.

3.2 Die Bautechnik: Vom Pisébau zum Stampfbeton⁶²

Während bis zum 18. Jahrhundert Holz das vorherrschende Konstruktionsmaterial im Wohnungsbau war, begann um die Wende zum 19. Jahrhundert eine Diskussion um diesen Baustoff.⁶³ Holz wurde insbesondere als Brennstoff immer wichtiger und damit auch knapper, der Preis stieg. Für die Holzverknappung wurden zahlreiche Gründe verantwortlich gemacht. Ernst Samuel Heinrich Böthcke, der zu einem der Hauptverfechter holzsparender Bauweisen zu zählen ist,⁶⁴ gibt hierzu eine ausführliche Auflistung:⁶⁵ *„Die Entstehung des Holz Mangels ist mancherlei Ursprungs, die zeither so sehr zugenommene Bevölkerung besonders in den Königl. Preussischen Staaten, die Cultur aller Länder durch Anlage nützlicher Fabriken in den Städten, und dadurch nothwendig gewordene Vergrößerung der letztern, Vermehrung der Brau- und Brandhäuser, der Ziegel- und Kalksteinbrennereien etc. Die Anlage ganz neuer Dörfer und Colonien haben ihn auf eine vorwurfsfreie Art erzeugt, ausserdem aber trug von jeher zur Holzverschwendung die alte Methode sehr viel bei, alle ländliche Wohn- und Wirthschafts-Gebäude entweder ganz von Holz, (so genanntem Gehrsaß) oder auch in Fachwerk zu erbauen; auch sind die Forsten seit einigen Jahren besonders in der Chor- und Neumark durch Stürme und die so genannte Kienraupe sehr mitgenommen worden, und in Westpreussen haben Brände große Verheerungen angerichtet. Rechnet man zu allen diesen nun noch hinzu, daß um den mehreren Menschen auf dem Lande Wohnplätze anzuweisen, und dem Ackerbau und der Viehzucht mehr Ausdehnung zu verschaffen, ganze Strecken Wald und mit Holz bewachsene Brüche haben urbar gemacht, und gerodet werden müssen: so ist es um so einleuchtender, daß jetzt auf die Ersparung des Holzes alle mögliche, jedoch dem gemeinen Wesen nicht lästige, Sorgfalt verwendet werden muß, wenn der augenscheinliche Mangel an allen Arten von Holz nicht den nachtheiligsten Einfluß auf die Staaten-Verfassung haben soll.“* [Böthcke 1795, S. 1–2].

Als weiterer Hauptgrund für die grundsätzliche Diskussion um den Baustoff Holz ist die Brandgefahr bei Gebäuden aus Holz zu nennen [Senff 1812, S. I–III].⁶⁶ Die genannten Aspekte veranlassten die Architekten nach alternativen Konstruktionen zu suchen. Vielfach wurden Massivbauweisen befürwortet:⁶⁷ Gebäude aus Werkstein waren bereits lange bewährt, jedoch blieben sie für die meisten Bevölkerungsschichten unbezahlbar.

⁶² Der Inhalt dieses Kapitels wurde in stark verkürzter Form vorveröffentlicht in [Veihelmann 2015c].

⁶³ Vgl. z. B. „Bei jedem patriotischen Staats-Bürger, der Gefühl für das gemeine Beste hat, muß die Bauart von Holz, welche besonders in hiesigen Gegenden so ausschließlich beliebt ist, den Wunsch erwecken, dieser Holzverschwendung und der damit verbundenen größern Feuersgefahr Einhalt zu thun, um die Sicherheit des Eigenthums für sich und seine Mitbürger fester zu gründen.“ [Held 1808, S. V].

⁶⁴ Seine Abhandlung zum Lehm- und Ziegelbau nennt er daher „Beyträge zur Lehre wie man mit möglichster Schonung des Holzes alle Landgebäude wohlfeil, dauerhaft und feuersicher bauen kann“.

⁶⁵ Eine weitere, äußerst ausführliche Aufstellung findet sich in [Güntzel 1986, S. 53–57].

⁶⁶ Vgl. auch Fußnote 63.

⁶⁷ Z. B. mahnt Sachs die Rückbesinnung auf Gebäude aus Erde an. Diese Bauweise sei nicht neu, jedoch zwischenzeitlich verloren gegangen: „Als der Mensch noch im Stand der Kindheit war, baute er sich Hütten von Erde, und verschaffte sich so mit eigener Hand, ohne fremde Hülfe, dasjenige, was ihm am unentbehrlichsten war. Kultur, Vorurtheile und Gewinnsucht entrissen ihm nach und nach diese Wohlthat, welche unsere Erde ihren Bewohnern unmittelbar und auf die einfachste Weise darreichte, und gaben ihm dafür enge, zerbrechliche, feuergefährliche und ungesunde Wohnungen, deren Erwerbung und Erhaltung dem Besitzer einen bedeutenden Aufwand an Kosten verursacht.“ [Sachs 1822, S. 3–4].

Backsteinbauten waren zwar bekannt und auch kostengünstiger als Werkstein, eine weitere Vereinfachung – und damit auch Kostensenkung – versprach sich Jean Baptiste Rondelet jedoch durch das Bauen mit Stampflehm [Rondelet 1802, Bd. 1, S. 228]. Dabei war der Baustoff Lehm ein seit alters her etablierter Baustoff, er wurde für anfallende Bauaufgaben verschiedentlich genutzt, z. B. für Lehmziegel oder als Lehmputz.⁶⁸ Das neuartige an der Stampfbauweise aber war der monolithische Charakter der Bauteile: François Cointeraux beschrieb die Bauweise derart, dass sie weder Zwischenräume noch Fugen habe, dass dabei keine Verbindung einzelner Massen stattfindet, sondern vielmehr Bauteile aus einem Stück erstellt werden [Cointeraux, Seebaß 1989a, S. 4; Abbildung 3.2]. Für den Stampflehm bau setzte sich auch im Deutschen das Wort *Pisé* durch, das nach Cointeraux „*massiv*“ oder „*aus einer Masse*“ bedeuten soll [Cointeraux, Seebaß 1989a, S. 4]. Gebaut wurden die *Pisé*wände auf einem konventionellen Mauerwerkssockel, der widerstandsfähiger gegen Spritzwasser und Feuchtigkeit war. Darauf wurde die Schalung errichtet, in der die Erde schichtenweise eingebracht und festgestampft wurde (Abbildung 3.3). Die Schalung bestand aus Längsbrettern vornehmlich aus Tannenholz, die mit Querriegeln vernagelt wurden. Oberseitig wurden als Abstandhalter Stangen eingesetzt. Seitlich gehalten wurden die Längsbretter durch Pfosten, die ihrerseits mittels Keilen in Klammern aus Hartholz fixiert wurden. Die Pfosten wurden oberseitig durch Seile gegeneinander verspannt. Der Stampfer wurde aus Hartholz gefertigt. Mit diesem wurde die Erde dann solange gestampft, bis der Stampfer auf der Oberfläche kaum noch einen sichtbaren Eindruck hinterließ. Dann wurde erneut Erde darübergerbreitet und die nächste Schicht festgestampft. Die Schichtdicke bewegte sich zwischen drei und vier Zoll, was in etwa 8–11 cm entspricht. Wenn die ganze Höhe der Schalung ausgestampft war, wurde die Schalung versetzt und an anderer Stelle mit dem gleichen Ablauf wieder begonnen [Cointeraux, Seebaß 1989a, S. 12–28].

Bei der Wahl der Erde kam es zwar auch auf den Lehmgehalt an, entscheidender war jedoch der Wassergehalt. Idealerweise hatte der Baustoff die Konsistenz frisch ausgegrabener Erde. In diesem Zustand war das Feststampfen am effektivsten [Gilly 1797, S. 32]. Die Grundsätze der Stampfbauweise – Schalungskonstruktion, schichtweises Einbringen und Stampfen sowie erdfeuchte Konsistenz des Baustoffs – blieben erhalten, was sich jedoch im Laufe des frühen 19. Jahrhunderts änderte, war das Bindemittel. Die historische Entwicklung der Stampfbauweise wird im Folgenden dargestellt.

3.2.1 Der *Pisé*bau

Die Wurzeln des *Pisé*baus liegen weit zurück. Letztlich wird sich wohl aus heutiger Sicht der Beginn dieser Bauart nicht mehr feststellen lassen. Neuzeitliche Beschreibungen des *Pisé*baus beginnen mit Charles Philippe Dieussarts „*Theatrum Architecturae Civilis*“ von 1682 [Dieussart 1682, S. 21]. Abbildung 3.4 zeigt die Darstellung einer Lehmwand aus diesem Werk. Zu sehen ist der grundsätzliche Aufbau der Schalung, die in diesem Fall auffallend einfach ausgebildet ist, sowie die Füllung derselben.

Dieussart schreibt dazu: „*Es werden von Steine gute Fundamenta zwo Schue hoch von der Erden gelegt/ als dann/ nach dem die Maur soll dick seyn / von beyden Seiten Bretter in die*

⁶⁸ Zum Lehm bau in Deutschland vgl. [Güntzel 1986].

Höhe / wie eine Kaste gesetzt/ in selbiger wird gute Lehm Erde mit Stroh durch arbeitet/ eingeschlagen/ und allzeit mit Füßen durch getreten/ wann nun der Leim etzliche Tage gestanden / und sich fäste gesetzt / werden die Bretter weggenommen“ [Dieussart 1682, S. 21].

Nach beschriebenem Material, Herstellungs- und Verdichtungsweise ist die von Dieussart beschriebene Bauweise zweifelsfrei dem Pisébau zuzuweisen, wenngleich dem späteren Pisé im Allgemeinen kein Stroh beigemischt wurde. In der Mailänder Gegend, berichtet Dieussart [Dieussart 1682, S. 21], sowie in wenigen Gegenden Frankreichs, insbesondere um Lyon [Blondel 1777, S. 424], war diese Bauart verbreitet.

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts rückte der Pisébau wieder verstärkt in das Bewusstsein – neu sei allerdings der „*Grad von Vollkommenheit*“ [Cointeraux, Seebaß 1989a, S. 2]. Den Beginn dieser Wiederentdeckung markierten die Publikationen von Georges-Claude Goiffon aus dem Jahre 1772⁶⁹ sowie Artikel im „*Cours d'architecture*“⁷⁰ und im vierten Band der „*Encyclopédie méthodique*“⁷¹ im Jahr 1785 (Abbildung 3.5).

Waren die genannten Publikationen der Anfangsjahre noch auf allgemeine Beschreibungen der Bauweise beschränkt, so ging man bereits wenige Jahre später dazu über, regelrechte Gebrauchsanleitungen zum Pisébau zu schreiben. Erstmals schrieb François Rozier, Autor einer ab 1782 erscheinenden Enzyklopädie zur Landwirtschaft und zum landwirtschaftlichen Bauwesen: „*Ich habe zum selben Thema im Jahr 1772 in meinem Journal de Physique einen Artikel von Herrn Goiffon abgedruckt, aber dieser war nicht ausreichend klar und methodisch, um ihn hier abzudrucken.*“⁷² [Rozier 1787, S. 719]. Die nachfolgenden Publikationen enthielten neben genauen Maßangaben auch vertiefte Hinweise zu den benötigten Werkzeugen und deren Herstellung (Abbildung 3.6), zu Materialien, zum Bauablauf, und auch bis ins Kleinste aufgeschlüsselte Kostenaufstellungen. Mit diesen detaillierten Arbeitsanweisungen wollte man insbesondere die Bevölkerung ländlicher Gegenden in die Lage versetzen, die Arbeiten selbst auszuführen, so dass neben der eigenen handwerklichen Leistung kaum Kosten entstanden [Cointeraux, Seebaß 1989a, S. 2–3]. Die Ausgaben konnten dadurch begrenzt werden, dass ausschließlich direkt vor Ort vorhandenes Material verwendet wurde und dass auch die Ausführung relativ einfach war: Der Großteil der Aufgaben konnte von ungelerten Arbeitern bzw. von der Landbevölkerung selbst ausgeführt werden. Lediglich der Bau von Rüstungen und Schalungen erforderte ausgebildete Zimmerleute.

Die wichtigsten Vorteile der Stampfbauweise, die immer wieder in den Mittelpunkt gerückt wurden, waren die Einsparung des Holzes, die geringen Kosten und die höhere Sicherheit gegen Feuer [Cointeraux, Seebaß 1989a, S. 1–2]. François Cointeraux⁷³ gab in

⁶⁹ „L'Art du Maçon Piseur“ [Goiffon 1772]; im selben Jahr erschien auch eine Monographie unter demselben Titel.

⁷⁰ Herausgegeben von Jacques François Blondel im Jahre 1777 [Blondel 1777, S. 424–432].

⁷¹ Von Charles-Joseph Panckoucke herausgegeben [Lacombe, Panckoucke 1785, S. 320–335].

⁷² Original: „J'avois, en 1772, imprimé dans le Journal de Physique un mémoire de M. Goiffon, sur le même sujet; mais il n'étoit ni assez clair ni assez méthodique pour l'imprimer ici.“

⁷³ Teilweise auch in der Schreibweise Cointereaux.

seiner seit 1790 erschienenen „*École d'architecture rurale*“, welche als deutsche Übersetzung erstmals 1793 unter dem Titel „*Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande*“ erschien, eine ausführliche Beschreibung der Vorteile: „*Man erlaube uns anzumerken, daß man diese Art zu bauen in allen Ländern anwenden sollte, es sey um die Dörfer lachender, angenehmer zu machen; es sey zur Ersparung des Holzes, das man in zu großer Menge bey den gemeinen Bauten verwendet; es sey zur Vermeidung der Feuersbrünste; es sey zur Sicherstellung der Landleute, gegen die Kälte und außerordentliche Hitze, und zu gleicher Zeit zur Erhaltung und Stärkung ihrer Gesundheit; es sey endlich (...) noch die einzige, welche die Verminderung und Geschwindigkeit der Bauarbeit verschafft, diejenige, die den Vortheil gibt, sein Haus beinahe eben so bald bewohnen zu können, als es vollendet ist.*“⁷⁴ [Cointeraux 1793a, S. 56].

François Cointeraux war es auch, der mit seinen vier Heften der „*École d'architecture rurale*“ [Cointeraux 1790] dem Pisébau zum Ende des 18. Jahrhunderts zu einer breiten Wahrnehmung verhalf. Der Bekanntheitsgrad seiner Schriften war so hoch, dass allein in deutscher Sprache mehrere Übersetzungen aufgelegt wurden, so etwa der bereits genannte „*Praktische Lehrbegriff*“ [Cointeraux 1793a]; Güntzel nennt in seiner Dissertation zum Lehm- und Kalkbau in Deutschland weitere Übersetzungen in den Jahren 1801, 1803 [Cointeraux, Seebaß 1989a], 1806, 1826, jedoch ohne weitere Nachweise zu nennen [Güntzel 1986, S. 64]. Zusätzlich anzuführen ist der preußische Baubeamte David Gilly, der sich in seinem „*Handbuch der Land-Bau-Kunst*“ (1797) auf Cointeraux bezieht und seine eigenen Ausführungen zum Pisébau als freie, sehr gekürzte Übersetzung bezeichnet [Gilly 1797, S. 29].

3.2.2 Der Kalk-Sand-Pisébau

Der Pisébau geriet rasch an seine Grenzen: Insbesondere die Verbesserung der Widerstandsfähigkeit gegen Feuchtigkeit, Witterung und das Eindringen von Nagetieren, aber auch die Erhöhung der Festigkeit begründeten die Notwendigkeit eines anderen, besser geeigneten Baustoffes. Dies gelang, indem man das Bindemittel Lehm durch Kalk ersetzte. Die Bauweise blieb ansonsten gleich.

Im Jahre 1834 erbaute Carl Gustaf Rydin ein Gebäude aus Kalkmörtel (Abbildung 3.7). Auslöser für die Mörtelbauweise von Rydin war ein verheerender Brand im Jahr 1828 [Engel 1851, S. 3]. Sowohl in der zeitgenössischen wie auch in der modernen Literatur wird dieses Bauwerk mehrfach als Startschuss für den so entstehenden Kalk-Pisé genannt.⁷⁵ Die Verfasserin der vorliegenden Arbeit teilt diese Ansicht allerdings aus mehreren Gründen nicht. Die Bauweise Rydins, die in mehreren zeitgenössischen Artikeln

⁷⁴ Original: „Qu'il me soit permis d'observer qu'on doit employer ce genre de bâtir dans toute la République, soit pour la décence des villages et l'honneur de la nation, soit pour épargner les bois qu'on employe en si grande abondance aux constructions, soit pour éviter les incendies, soit pour garantir les laboureurs du froid et des excessives chaleurs, en même temps conserver et affermir leur santé, soit pour tant d'autres objets, trop longs à rapporter, si utiles à l'état et aux propriétés particulières; par exemple, comme celui qui procure la diminution et la promptitude du travail; comme celui qui donne l'avantage d'habiter ces maisons presque aussi-tôt qu'elles sont parachevées“ [Cointeraux 1790, S. 20].

⁷⁵ Zeitgenössisch z. B. [Krause 1851, S. 1]; sekundär z. B. [Liebold 1875, S. 51]; modern z. B. [Kahlow 1999, S. 17].

beschrieben wurde,⁷⁶ unterscheidet sich grundlegend von der reinen Stampfbauweise. Nach [N. N. 1842] wurde für das Gebäude ein komplettes Gerüst aus Holz abgezimmert, einschließlich des Dachstuhls. Nachfolgend wurde eine Bretterschalung aufgebracht, die dann mit Mörtel, in den Steine und Ziegelbrocken eingedrückt wurden, schichtweise ausgegossen wurde. Diese Ausführungen zeigen mehrere signifikante Unterschiede zum eigentlichen Pisébau: Die Kalkmörtelwände dienen in diesem Fall nicht dem Lastabtrag, sondern lediglich dem Raumabschluss, entsprechend tragen die Pfosten des Hausgerüsts auch die Bezeichnung „*Tragbäume*“ [Ström 1842, S. 503]. In statischer wie auch in konstruktiver Hinsicht ist also vielmehr von einer Sonderart des Fachwerkbbaus zu sprechen, wohingegen beim Pisébau die Wände für die Lastabtragung genutzt werden. Darüber hinaus ist diese Herstellungstechnik dem Gussmörtel zuzuordnen und nicht dem Pisé, da der Mörtel eindeutig in flüssiger Konsistenz eingebracht und nicht durch Stampfen verdichtet wurde. Zudem werden die Zuschläge eingedrückt und nicht in bereits fertiger Mischung mit dem Mörtel eingebracht.

Des Weiteren sind Quellen nachweisbar, die schon deutlich früher als Rydin von Kalkbeimischungen sprechen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass solche Versuche bereits vor dem Erscheinen der Lehm-Pisépublikationen durchgeführt wurden, mit Sicherheit jedoch weit bevor der Name Kalk-Sand-Pisé üblich wurde.

Bereits der „*Praktische Lehrbegriff*“ von 1793 spricht „*von den zusammengestampften Mörteln, oder von der Veststämpfung (Massivation)*“⁷⁷ [Cointeraux 1793b, S. 13] und weiter von der Kunst „*zusammengemischte und durch einandergeriebene Materialien, wie Sand, Schotter, Trümmer von gebrannter Erde und Kalk, vest und innigst zusammenzudrücken*“, dieses sei auch das Mittel, Bauteilen eine „*beträchtliche und dauerhafte Dichtigkeit zu geben*.“⁷⁸ [Cointeraux 1793b, S. 16–17]. Durch die Zumischung von gebrannter Erde – also einem hydraulischen Bestandteil – wurde hier bereits die verbesserte Feuchtebeständigkeit mittels Verwendung hydraulischer Mörtel auch im Hochbau beschrieben.

Den Begriff Kalk-Pisé verwendet Karl Marcell Heigelin im Jahre 1827 [Heigelin 1827, S. 81]. Während er hier noch von Zumischungen von Kalk zur Erde spricht, um die Wetterseite vor dem Angriff der Nässe zu schützen, beschreibt er bereits ein Jahr später, dass „*ein gänzlich rauhes Mörtelgemäuer (...) aus vollkommen unregelmässigen Steinen gemacht*“ werde. Der Mörtel sei „*aus geschlemmtem Sand, Glas-artig gebrannten Ziegelstücken und frisch gelöschtem Kalk wohl durchgeschafft*“ [Heigelin 1828, S. 43]. Und je unregelmässiger die Steine, desto besser und zuverlässiger müsse der Mörtel sein [Heigelin 1828, S. 43].

Auch beim Kalk-Pisé sah man die Vorteile in der monolithischen Ausführung: Hieronymus Franz Rödlich verglich in seiner 1829 erschienenen Schrift „*Praktische und historische Darstellung der Erd-Bau-Kunst*“ die Pisé-Steine mit den gestampften Mauern: „*Aber diese*

⁷⁶ Beschreibungen z. B. [Engel 1847]; [Rydin 1834]; [Körte 1837]; [Ström 1842].

⁷⁷ Original: „Des Mortiers comprimés ou de la Massivation.“ [Cointeraux 1790, second cahier, S. 5].

⁷⁸ Original: „L’art de la massivation sur des matériaux amalgamés & corroyés, comme sur le sable, les graviers, cimens & la chaux, est aussi le moyen que l’homme peut employer pour procurer aux ouvrages une densité grande & durable.“ [Cointeraux 1790, second cahier, S. 6].

aus Massen dergestalt in Form gepreßten Steine, sind nicht von dem vortrefflichen Gehalt und der Dauer, wie die Mörtel- oder Lehmmauern, welche zwischen Blockformen lagenweise (...) gestampft (...) werden.“ [Rödlich 1829, S. 72]. Zur Verbesserung der Bauweise schlug er gar den Einsatz einer Stampf-Ramm-Maschine vor, die die Ausführung rationalisieren sollte. Eine solche Art des Mauerwerks⁷⁹ werde so dicht und fest, dass es in kürzester Zeit nicht mehr zu verwüsten sei [Rödlich 1829, S. 72].

Ab dem Jahr 1842 erschienen zahlreiche Publikationen zum Thema Kalk-Sand-Pisé. Der Grund hierfür war witterungsbedingt: Das Jahr 1842 brachte, durch eine längere Dürreperiode begünstigt, zahlreiche schwere Brände hervor. August Leopold Crelle bezeichnete die dadurch verursachten Zerstörungen an Eigentum und Gebäuden der Bevölkerung als so kostspielig wie einen schweren Krieg und mahnte zum besseren Schutz gegen Feuer [Crelle 1843, S. 1–2].⁸⁰ Der Bedarf nach einer feuersicheren Bauart war groß wie nie.

Den Beginn der „Publikationswelle“ zum Kalk-Pisé machte Johann Gottlieb Prochnow im Jahre 1842, in demselben Jahr, in dem auch das Rydinsche Mörtelhaus in Deutschland durch mehrere Artikel nochmals ins Bewusstsein gerückt worden war: „*Wie soll man aber wohlfeil und zugleich feuer- und wetterfest bauen? Jenes ist die Frage und dies sind die Anforderungen, welche wir an unsere Gebäude zu machen haben, und meine Antwort darauf: mit Sand und Kalk!*“ [Prochnow 1842, S. 6]. Prochnows Hauptaugenmerk lag dabei auf der sparsamen Verwendung des Kalkes, denn nur dieser musste zugekauft werden, alle anderen Materialien gab es kostenlos vor Ort. Er machte sich ausführliche Gedanken, welche Korngrößenzusammenstellungen den geringsten Verbrauch an Kalk bedeuteten und gab hierzu genaue Mischungsverhältnisse an. Bereits beim Erscheinen der zweiten Auflage seines Buches sechs Jahre später hatte sich die Bauweise gut entwickelt und überraschend ausgebreitet [Prochnow 1848, S. IV].

Über die zahlreichen Vorteile der Kalk-Sand-Pisé-Bauten sprachen sich beinahe alle Publikationen aus. Eine besonders ausführliche Auflistung findet sich in der „*Anleitung zur Kalk-Sand-Bau-Kunst*“ von Friedrich Krause aus dem Jahr 1851: Festigkeit und Dichtigkeit, Abkürzung der Bauzeit und Trockenheit der Räume, Feuersicherheit und Reinlichkeit, Verminderung der Unterhaltungskosten, Verminderung der Gebäude-Grundfläche aufgrund dünnerer Außenwände, geringe Kosten und deshalb besonders für „*unbemittelte Klassen*“ zu empfehlen, Anwendung der Kalksandmasse zu Bedachungen,

⁷⁹ In der historischen Literatur wird der Begriff Mauerwerk sowohl für gemauerte Konstruktionen aus zusammengesetzten Steinen im heutigen Verständnis wie auch für monolithische Bauteile beispielsweise aus Beton verwendet.

⁸⁰ Ausführlich: „Das Jahr 1842, mit seinen ungewöhnlich zahlreichen und bedeutenden, durch die Dürre beförderten Feuerbrünste, hat wahrlich eine nur zu herbe Mahnung gegeben, daran zu denken und Hand anzulegen, sich und sein Eigenthum gegen die Gewalt des Elements zu schützen, welches gezügelt, so unendlich wohlthätig, entfesselt, so zerstörend ist. (...) Bis zu welcher ungeheuern Ausdehnung die Zerstörungen anwachsen können, bloß durch den so leicht möglichen Umstand, daß es einmal einige Wochen lang zu wenig regnete: davon giebt das Jahr 1842 einen nur zu traurigen Beleg. Deutschland allein kosten die Zerstörungen des Feuers an den Gebäuden und an der beweglichen Habe seiner Bewohner in diesem einen Jahre vielleicht an 100 Millionen Thaler; also so viel als ein schwerer Krieg. (...) Wahrlich solche Wunden, den Völkern geschlagen, sind zu schmerzhaft, als dass sie nicht endlich auf jene nie aufhörende Landplage sie aufmerksam machen und anregen sollten, ernstlich Mittel zu ergreifen, um sich gegen dieselbe besser zu waffnen.“ [Crelle 1843, S. 1–2].

freie Wahl auch runder Grundformen [Krause 1851, S. 88–95]. Friedrich Engel, einer der bedeutendsten Verfechter des Kalk-Sand-Pisés, hebt in einem 1847 erschienenen Artikel neben den praktischen Vorzügen insbesondere die geringen Kosten hervor. Im Vergleich zum Fachwerkbau zieht er ein für diesen vernichtendes Urteil: Wegen des geringen Kalkbedarfs sowie des nicht benötigten Putzes sei sogar *„der schlechteste Bau aus Fachwerk (...) bedeutend kostspieliger (...) als jener.“* [Engel 1847, S. 14].

3.2.3 Der Stampfbeton

Während man die Bautechnik beibehielt, erfolgte um etwa dieselbe Zeit eine weitere Verbesserung der Stampfbauweise durch die Verwendung von hydraulischen Bindemitteln, insbesondere von künstlich hergestelltem Zement. Louis-Joseph Vicat hatte in den späten 1810er Jahren die theoretischen Grundlagen für die Weiterentwicklung des hydraulischen Mörtels in Frankreich gelegt [Vicat 1818]. Etwa zeitgleich erfolgten die Forschungen zum gleichen Thema in Deutschland durch Johann Friedrich John [John 1819]: Beide untersuchten unabhängig voneinander die Eigenschaften hydraulischer Mörtel.

John war dem Baufach völlig fremd, er hatte *„Arzneikunde“* studiert und war dann zum Professor für Chemie in Berlin ernannt worden [John 1819, S. XIII]. Er begann seine Forschungen aufgrund einer Preisausschreibung der holländischen Gesellschaft der Wissenschaften, deren Aufgabe darin bestand, den chemischen Grund dafür herauszufinden, dass Kalksteinmörtel eine höhere Festigkeit habe als Muschelschalenmörtel. Des Weiteren sollte eine Möglichkeit gefunden werden, die Eigenschaften des Muschelschalenmörtels künstlich zu verbessern [John 1819, S. V]. Dabei ist unter Muschelschalenmörtel ein reiner Kalkmörtel, unter Kalksteinmörtel Mörtel mit hydraulischen Bestandteilen zu verstehen [vgl. John 1819, S. 109–110]. John reichte seine Untersuchungsergebnisse 1815, in erweiterter Form nochmals 1817 ein: In der Zusammenfassung seiner Forschungen stellte er fest, dass der Unterschied beider Mörtelarten im hydraulischen Anteil liege und dass durch Zugabe von Ton, Kieselerde und Eisenoxyd zum reinen Kalkmörtel sowie nachfolgendes Brennen hydraulische Bindemittel künstlich hergestellt werden können [John 1819, S. 110].

Während Johann Friedrich John als Chemiker seine Erkenntnisse durch theoretische Überlegungen sowie Versuche im Labor gewonnen hatte, stellte Vicat vor allem praktische Versuche an [Quietmeyer 1911, S. 84]. Sein Antrieb war die Überwindung bautechnischer Schwierigkeiten. Er gelangte auf dem Wege von Brennversuchen und deren wissenschaftlicher Auswertungen zum Erfolg [John 1819, S. XII]. Auch Vicat fand den hydraulischen Anteil als maßgebendes Element und beschrieb die künstliche Umwandlung von reinem in hydraulischen Kalk. Im Gegensatz zu John jedoch fiel Vicats Beschreibung sehr viel praktischer aus: Um keinen Zweifel an der Machbarkeit der Umwandlung von reinem in hydraulischen Kalk aufkommen zu lassen, präsentierte er eine genaue Aufstellung, wieviel ein Kubikmeter des so hergestellten hydraulischen Kalkes koste, inklusive der dafür benötigten Öfen. Sein Fazit: Die Herstellung künstlichen hydraulischen Kalks nach seiner Empfehlung sei nicht schwierig, sondern durchführbar [Vicat 1818, S. 8–10]. Während die Arbeit von John nahezu unbeachtet blieb, löste Vicats Abhandlung in Frankreich die Gründung zahlreicher Fabriken zur Herstellung

hydraulischer Kalke aus. So wichtig die Arbeiten von John und Vicat zweifelsohne für den Betonbau waren: Sowohl Bauweise als auch Materialien waren schon vorher bekannt.⁸¹ Die systematische Erforschung der Hydraulizität des Mörtels sowie deren künstliche Herstellung bei gleichbleibender Qualität führte jedoch zu einer sehr viel breiteren und häufigeren Anwendung des Betons, so dass die Forschungen von Vicat und John als wichtiger neuer Impuls für die Verwendung von Beton angesehen werden müssen.

Insbesondere in Frankreich wurden die Arbeiten von Vicat rezipiert. Während viele Architekten und Ingenieure sich auf die etablierten Anwendungen von Beton im Grund- und Wasserbau beschränkten, war François-Martin Lebrun einer der Hauptpropagandisten für die Verwendung von hydraulischem Bindemittel auch im Hochbau: *„Zahlreiche Ingenieure meinten – und viele teilen diesen Gedanken immer noch – dass die hydraulischen Mörtel ausschließlich im Grund- oder Wasserbau eingesetzt werden dürfen: Das ist ein schwerwiegender Irrtum. Ich habe es bereits gesagt, und man kann es nicht genügend oft wiederholen: Die hydraulischen Mörtel führen immer zu unendlich besseren Ergebnissen als reiner Kalkmörtel, und das unter jeglichen Umständen, auch für Ziegel- oder Bruchsteinmauerwerk oder für Putzarbeiten.“* [Lebrun 1843, S. 88].⁸² Zusammen mit seinem Bruder Jean-Auguste begann François-Martin Lebrun gegen Ende der 1820er Jahre mit dem Bau von Gebäuden aus Beton.⁸³

1830 baute Jean-Auguste sein dreigeschossiges Wohnhaus komplett aus Beton (System in Abbildung 3.8). Lebrun selbst schrieb, er baue *„geleitet von den ausgezeichneten Arbeiten des Herrn Vicat über die hydraulischen Kalke.“*⁸⁴ [Lebrun 1842, S. 286].⁸⁵ Durch den unbeirrten Einsatz von Beton wie auch das Publizieren der Ergebnisse durch François-Martin Lebrun⁸⁶ bewiesen die Brüder die Leistungsfähigkeit von Beton und zeigten auch das kommerzielle Interesse, das Bauen mit Beton voranzutreiben. Die beiden Lebruns führten zusammen drei Unternehmen, die sich auf den Umgang mit Beton spezialisiert hatten [Nègre 2006, S. 131–133]. Weiterhin ist es ihr Verdienst, dem Beton eine breitere Wahrnehmung verschafft zu haben.⁸⁷

⁸¹ Vgl. Kap. 3.1; [Holzer 2014a] und [Holzer 2015].

⁸² Original: „Beaucoup de constructeur avaient pensé, et plusieurs partagent encore la même idée, que les mortiers hydrauliques ne devaient être employés que pour les maçonneries souterraines ou immergées: c’est une grave erreur. Je l’ai déjà dit, et on ne saurait trop le répéter: les mortiers hydrauliques donneront toujours des résultats infiniment supérieur à ceux de chaux grasses, dans quelques circonstances qu’ils soient employés, soit pur des maçonneries en briques ou moellons, ou pour des crépissures et enduits.“ Vgl. auch: „Tous les constructeurs qui, jusqu’à ce jour, ont parlé dans leurs ouvrages de l’usage que l’on pourrait faire du béton, n’ont considéré cette espèce de maçonnerie que sous le rapport de son emploi en immersion, ou pour les fondations; et ce n’est pas que depuis quelques années que l’on a songé à l’utiliser à des constructions aériennes, exposées aux intempéries de l’atmosphère.“ Oder zu Deutsch: „Keiner der Ingenieure, die bisher in ihren Abhandlungen über den Gebrauch von Beton geschrieben haben, hat diese Bauart über die Verwendung unter Wasser oder für Gründungen hinausgehend betrachtet. Und erst seit wenigen Jahren denkt man überhaupt darüber nach, den Beton auch im Hochbau einzusetzen.“ [Lebrun 1843, S. 87].

⁸³ Vgl. Werkverzeichnis in [Rico 2001, ab S. 88].

⁸⁴ Original: „guidé par les beaux travaux de M. Vicat sur les chaux hydrauliques.“

⁸⁵ Vgl. Kap. 3.2.3.

⁸⁶ Z. B. [Lebrun 1835], [Lebrun 1841], [Lebrun 1842], [Lebrun 1843].

⁸⁷ Selbst deutsche Publikationen zu Kalksand-Pisé und Beton beziehen sich häufig auf Lebruns Arbeiten, z. B. [Prochnow 1842, S. 20], [Mihálik 1858, S. 164–165], [N. N. 1865a], [Engel 1865, S. 84–91] usw.

Die Verwendung von hydraulischem Bindemittel verschaffte dem Beton gegenüber dem Kalkpisé die Vorteile noch besserer Witterungsbeständigkeit, Abbinden unter Luftausschluss sowie höherer Festigkeit und schnellerer Erhärtung. Die Qualität des Betons hing von mehreren Faktoren ab. Lebrun nannte Mischungsverhältnis, Mischungsart, Trocknungsgeschwindigkeit und das Stampfen. Gemischt wurde von Hand. Wichtig war ein ausreichend langes und kräftiges Durcharbeiten der Bestandteile. Das Mischungsverhältnis wurde abhängig von den Erfordernissen sowie von der Beschaffenheit der zur Verfügung stehenden Bestandteile gewählt. Vorschriften für die richtige Zusammensetzung des Betons gab es nicht: *„Die Erfahrung muß in dieser Beziehung zur Führerin dienen.“* [Lebrun 1837, S. 42–43].

Die erste deutschsprachige Monographie zum Stampfbeton war Johann von Mihálik's *„Praktische Anleitung zum Béton-Bau für alle Zweige des Bauwesens“* aus dem Jahr 1858. Er hatte zuvor verschiedene Abhandlungen über die Bauweise durchgearbeitet und entsprechende eigene Versuche unternommen [Mihálik 1858, S. IV–V]. Auch wenn der Schwerpunkt seiner Abhandlung auf dem Bau der Franz-Josef-Schleuse⁸⁸ lag, lieferte Mihálik darüber hinaus eine umfassende Beschreibung von den Materialien über die Werkzeuge und Maschinen bis hin zu den verschiedenen Anwendungen des Betons: Neben den Wasserbauten wurden Straßen einschließlich ihrer Radabweiser und Trottoirs, Durchlässe bis hin zu ganzen Wohnhäusern (Abbildung 3.9) von Mihálik beschrieben. Nach seiner Erfahrung können Bauteile aus Beton weder zusammengedrückt noch verschoben werden. Auch das Auftreten von Schäden infolge ungleichmäßiger Setzungen hielt er für unmöglich. Mihálik war überzeugt von der Bauweise: *„Was aus Quadern oder Ziegeln erbaut wird, geht vom Momente seiner Herstellung an, dem allmählichen Verfall entgegen, während bei Bauwerken aus Béton die Vervollkommnung erst mit diesem Momente beginnt, weil der Béton an Güte täglich zunimmt, und oft 20 Jahre hindurch sich verbessert, bis er endlich seine Ausbildung erlangt.“* [Mihálik 1858, S. 139–140].

Dennoch wurde der Stampfbeton in Deutschland zunächst nur mäßig angenommen. Mehrere Einstürze neuerbauter Wohnhäuser in Berlin veranlassten Dr. O. A. Ziurek im Jahre 1861 zu ausführlichen Testreihen mit verschiedenen Mörteln. Wenngleich die Einstürze mit zu geringem Zementgehalt begründet wurden, gelangte Ziurek dennoch zu folgendem negativen Gesamturteil über den Portlandzement-Mörtel: *„Sicher ist, dass ein Zunehmen seiner Festigkeit von dem Zeitpunkte seiner vollendeten Erhärtung an nicht stattfindet, dass er vielmehr (...) sein Volumen (...) nicht unverändert beibehält und dadurch unter allen Umständen (...) eine Lockerung (...) bedingt. (...) Mein Urtheil geht dahin: dass alle über dem Wasser mit einem Cäment-Mörtel aufgeführten Mauerwerke, nach einer kurzen Periode grosser Festigkeit, viel früher der Zerstörung anheim fallen werden, als solche, die mit gutem Kalk-Mörtel verbunden sind.“* [Ziurek 1861, S. 70]. In einer prompten Reaktion auf diesen Artikel widerlegte bzw. bezweifelte Dr. Hermann Bleibtreu die von Ziurek getroffenen Aussagen: Die durchgeführten Proben seien nicht belastbar, da der Zementmörtel nach nicht ausreichender Erhärtung getestet worden sei. Bleibtreu, der als einer der maßgebenden Protagonisten der Zementindustrie in Deutschland zu sehen ist und als Zementfabrikant auch ein erhöhtes Interesse am Einsatz des neuen Bindemittels aufwies, versicherte, dass aufgrund eigener Erfahrungen sowohl Festigkeit als auch das

⁸⁸ Vgl. Kap. 3.1 sowie [Holzer 2015].

Verhalten bezüglich Volumenbeständigkeit so gut seien, dass ein Mauerwerk aus gutem Portland-Zement so fest werde, dass man es beim Abriss sprengen müsse, da sich niemals ein Stein mühelos vom Mörtel trennen lasse [Bleibtreu 1861, S. 500].

Die Probleme mit dem neuen, noch nicht ausreichend erforschten Material veranlassten die Berliner Baupolizei sogar zu einem Verbot von tragenden Betonbauteilen, welches von anderen Städten und Ländern übernommen wurde: 1865 war in einem Erlass des Königlichen Polizeipräsidiiums in Berlin zu lesen, dass Konstruktionen aus Zement, deren Festigkeit allein auf der Bindekraft des Mörtels beruhen, nicht ausgeführt werden dürfen [Königl. Polizeipräsidium Berlin 1866, S. 41–42].⁸⁹ Das Verbot hielt sich über Jahrzehnte – in seinem Buch *„Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen“* schrieb Friedrich Wilhelm Büsing noch im Jahre 1892: *„Thatsache ist nur, dass, diesem Beschlusse entsprechend, vielfache Versuche, Ausführungen in Beton-Konstruktionen an die Stelle von solchen zu setzen, welche gewöhnlich in Mauerkonstruktion hergestellt zu werden pflegen, auf den unüberwindlichen Widerstand der Berliner Baupolizei-Behörde gestossen sind, und – was schlimmer – dass das Beispiel, was diese Behörde damit gegeben, von den Baupolizei-Behörden der übrigen preussischen Städte nachgeahmt worden ist. Auch heut noch, wo in Berlin längst andere Anschauungen Platz gegriffen haben, (...) wird in anderen norddeutschen Städten noch vielfach an der Nichtzulassung von Betonkonstruktionen festgehalten!“* [Büsing 1892, S. 5–6].⁹⁰

Dass sich der Beton als Baustoff in Deutschland dennoch durchsetzte, ist im Wesentlichen drei Aspekten zuzuschreiben: Zum einen ist es den Unternehmern zu verdanken, die ungeachtet jeglicher Bedenken den Betonbau vorantrieben, oft auf eigene Kosten Bauten aus Beton ausführen ließen und somit dessen Verlässlichkeit bewiesen.⁹¹ Zum anderen rührt es daher, dass andere Länder das Verbot nicht übernommen hatten, dort mit Beton gebaut wurde und die positiven Erfahrungen dann wiederum nach und nach in Preußen Fuß fassten. Der dritte und wichtigste Aspekt war die stetig ansteigende Qualität des Zements.

Die Entwicklung des Stampfbetons im Hochbau im deutschen Sprachraum außerhalb Preußens wird im Folgenden anhand einiger Meilensteine erläutert. Am Anfang dieser Entwicklung stehen einige Häuschen für öffentliche Angestellte (Schleusen- bzw. Bahnwärter), die allesamt das gleiche Merkmal aufweisen: Den möglichst weitgehenden Verzicht auf alle anderen Baustoffe außer Beton.

⁸⁹ Polizei-Verordnung, Berlin, 11.04.1865, § 7 „Gewölbe und Bogen unter fünf Zoll Stärke und solche Konstruktionen aus Ziegeln und Cement, deren Festigkeit allein auf der Bindekraft des Mörtels beruht, dürfen nicht ausgeführt werden.“

⁹⁰ Ähnliche Aussage in der Deutschen Bauzeitung, 1889 zur Verwendung von Beton: „Allein betreff seiner, jedenfalls vortheilhaften Verwendung bei Treppen und Decken in öffentlichen Gebäuden, Luxus-Bauten und gewöhnlichen Wohnhäusern sind bisher kaum nennenswerthe Erfolge aufzuweisen, aus dem Grund, dass die Baupolizei-Behörde die Anwendung zu dem vorgenannten Zweck in den meisten Fällen nicht gestattet.“ [H. 1889, S. 342].

⁹¹ Als Beispiele können hier Bernhard Liebold (Analyse dazu in Kap. 4.5) sowie Dyckerhoff & Widmann (Untersuchung in [Stegmann 2014]) gelten: Beide hatten als Zementfabrikanten Interesse am Vertrieb ihres Zements und förderten durch eigene Bauwerke die breitere Akzeptanz bzw. eröffneten ganz neue Anwendungsgebiete.

Als erstes Bauwerk ist hier das in der modernen Forschung bisher wenig beachtete Schleusenwärterhäuschen an der Isar in München zu nennen, das in den Jahren 1858–1859⁹² erbaut wurde (Abbildung 3.10). In Haarmanns Zeitschrift für Bauhandwerker findet sich im Jahr 1861 ein Bericht: Es handelt sich um einen zweigeschossigen Bau von 9,93 m Länge, 4,96 m Breite und einer Höhe von 5,25 m. Dieses sei bis auf die Balkenlage über dem Erdgeschoss, den Türen und den Fenstern komplett aus Beton aus künstlichem, hydraulischem Kalk („*Münchener Cement*“) erbaut. Selbst der üblicherweise als Dachstuhl ausgebildete obere Abschluss sei durch ein Betongewölbe ersetzt: Holz oder Stein seien nicht zur Anwendung gekommen. Die Umfassungswände seien 58,4 cm dick, im Obergeschoss noch 43,8 cm, und das spitzbogige Gewölbe habe an der dünnsten Stelle eine Stärke von 14,6 cm [Großmann 1861, S. 54].

In Österreich war es Johann Salzman, der beim Bau der Pulverfabrik in Stein bei Laibach im heutigen Slowenien umfassend die Betonbauweise einsetzte [Salzman 1865]. Sowohl alle Wasserbauten, die für die Fabrik notwendig waren – Wehrbauten in der Feistritz, das Ausleitungsbauwerk für den Werkkanal sowie die Kanäle selbst – als auch Wege sowie ganze Fabrik- und Wohngebäude wurden aus Beton erstellt.⁹³ Die Arbeiten wurden um 1860 ausgeführt.⁹⁴ Als Bindemittel verwendete er einen vor Ort anstehenden hydraulischen Kalkstein, den er brennen und zu feinem Pulver mahlen ließ. Dies ergebe einen zu allen Bauten vorzüglich verwendbaren hydraulischen Kalk-Zement [Salzman 1865, S. 25]. Seine Erfahrungen verliefen positiv: Es sei an der Zeit, dem Betonbau mehr Aufmerksamkeit zuzuwenden, da bei intelligenter und sachkundiger Behandlung der Beton günstiger sei als Mauerwerk [Salzman 1865, S. 25].

Spätestens solche Versuche wie das beschriebene Münchner Häuschen oder auch die umfassende Bautätigkeit von Salzman beim Bau der Pulverfabrik in Stein bei Laibach bewiesen die grundsätzliche Eignung des Betons für Hochbauten und führten auch in den deutschen Ländern – wenn auch langsam – zu einer gewissen Akzeptanz. So schrieb Friedrich Engel, der zu den Hauptvertretern des Kalksandpisébaus gezählt werden muss: *„(...) es bleibt auch bei den heutigen Ausführungen von Deckenschlüssen aus Kalkpisé, die Tragfähigkeit des letzteren vorzugsweise von der Güte des Mörtels abhängig. Da ein schnelles Erhärten nothwendig ist, so wird der aus hydraulischem Kalke bereitete Pisé vor dem aus Luftmörtel bereiteten den Vorzug erhalten müssen.“* [Engel 1865, S. 86].

Ab der zweiten Hälfte der 1860er Jahre begannen dann auch ausführlichere Versuche diesbezüglich. Hier ist insbesondere die verbreitete Anwendung des Betons bei Bahnbauten der württembergischen Eisenbahn zu nennen, die bisher nach Meinung der Verfasserin in der Forschung zur Geschichte des Betons in ihrem Wert verkannt wird.⁹⁵

⁹² Das Baujahr gibt [Schlierholz 1870, S. 265] an: „von Kreisbaurath Ruland in München an einem im Jahr 1858/59 ausgeführten Wärterhäuschen an der Isar daselbst.“ [Schlierholz 1870, S. 264]. Vermutlich handelt es sich um das Häuschen des Schleusenwärters an der Marienklause. Zu dieser Zeit erfolgte eine Isarkorrektion im entsprechenden Flussabschnitt, vgl. [Rädlinger 2012, S. 107–109].

⁹³ Ebenso fünf Betonbrücken, vgl. hierzu Kap. 4.3.

⁹⁴ Die Bauten werden in Teilen bereits 1858 bei Mihálik erwähnt [Mihálik 1858, S. 365].

⁹⁵ Während die Wichtigkeit dieser Werke historisch bereits anerkannt war. So berichtet Liebold im Jahr 1880, der Beton sei in Deutschland erst im vergangenen Jahrzehnt eingeführt worden, wenn man von wenigen kleineren Versuchen absehe. „Die erste größere, ich möchte sagen, systematische Anwendung des Bétons hat

Während eine kurze Notiz ein auf der Strecke Ulm–Blaubeuren erstelltes Probebauwerk, das ausschließlich unter Verwendung von Beton erstellt wurde, noch als „bis jetzt einzig in seiner Art“ [N. N. 1868a] bezeichnet, liefert der Baurat Joseph Schlierholz im Jahre 1870 hierzu eine ausführliche Zusammenstellung [Schlierholz 1870].⁹⁶ Im Auftrag der königlichen Eisenbahnverwaltung baute Schlierholz die Bahnen in Oberschwaben. Da dort das Vorkommen natürlicher Gesteine gering sowie deren Qualität mangelhaft, Sand und Kies jedoch in bester Beschaffenheit reichlich vor Ort vorhanden waren, begann Schlierholz mit Überlegungen zum Einsatz von Beton. Seither sei der Beton vorzugsweise zu Fundamenten verwendet worden, im Hinblick auf die Vorbilder aus römischem Beton jedoch wolle er einen Versuch wagen, und zwar in der Art, dass die Gebäude vom Fundament bis zum Dach, einschließlich der Decken, Treppen und Fußböden aus Beton, teilweise zwischen eisernen Balken, bestehen sollten [Schlierholz 1870, S. 260–261; Abbildung 3.11]. Hierbei stellte er fest, dass Pisé und Kalk-Pisé für diesen Zweck wohl wenig geeignet seien, dagegen einige Zementfabrikanten ansässig seien, die „die Aufmerksamkeit auf die schnell bindenden und erhärtenden Cemente“ lenkten [Schlierholz 1870, S. 260]. Da dabei Bedenken seitens des Bauherrn auftraten, einigte man sich zunächst auf die Ausführung dreier Versuchs-Bahnwärterhäuser [Schlierholz 1870, S. 261]. Die ausgeführten Bauten (Abbildung 3.11) sehen dem Münchner Wärterhäuschen recht ähnlich, was damit zu begründen ist, dass Schlierholz dieses Bauwerk kannte.⁹⁷ Die Hülle der Gebäude sollte bei jeweils einem Probehäuschen aus Roman-Zement bzw. aus einem Gemisch von drei Teilen Roman- zu einem Teil Portland-Zement bzw. vollständig aus Portland-Zement ausgeführt werden [Schlierholz 1870, S. 261]. Dies wurde bewusst so gewählt, um die beste Ausführungsweise bestimmen zu können. Hauptfragen bei der Erstellung der Versuchsbauten waren Eigenschaften des Betons bezüglich Volumenbeständigkeit (Treiben und Schwinden), des Verhaltens gegen Trockenheit, Nässe, Hitze und Kälte, der Leitfähigkeit bezüglich Feuchte und Wärme sowie des Verhaltens der Gebäude gegenüber den Erschütterungen durch die Züge [Schlierholz 1870, S. 261].

Die Häuser wurden vom Sommer 1867 bis ins Frühjahr 1868 erbaut [Schlierholz 1870, S. 263].⁹⁸ Es zeigte sich, dass alle Ausführungen geeignet waren, wenngleich die Verwendung von Romanzement an der Außenhülle einen zusätzlichen Verputz erforderte.⁹⁹ Schlierholz fand jedoch heraus, dass bei Portland-Zementen der Zuschlag-Anteil höher ausfallen dürfe. Überdies weise dieser Beton eine höhere Festigkeit auf, ohne dabei wesentlich teurer zu sein. Die Ergebnisse waren durchweg zufriedenstellend und Schlierholz äußerte sich geradezu begeistert: Nach diesen Erfahrungen sei die Ausführung weiterer Bahnwärterhäuser, sogar ganzer Stationsgebäude und vielem mehr angeordnet worden, nicht nur der technischen Vorteile wegen, sondern „zugleich zum Zwecke der Verbreitung dieser nützlichen Bauart in den verschiedenen Gegenden Oberschwabens“ [Schlierholz 1870,

bei Errichtung von Bahnwärterhäusern bei den Königlich Württembergischen Eisenbahnen durch Baurath Schlierholz stattgefunden.“ [Liebold 1880, S. 4].

⁹⁶ Vgl. auch [N. N. 1868b].

⁹⁷ Dass der zuständige Baurat Schlierholz das Münchner Bauwerk kennt, kann man seiner Aufzählung bisher ausgeführter Gebäude dieser Art entnehmen, vgl. Fußnote 92.

⁹⁸ Und damit noch einige Jahre vor der weiter unten genannten Siedlung Victoriastadt in Berlin-Rummelsburg.

⁹⁹ Vgl. auch [N. N. 1870].

S. 263]. Bis zum Verfassen des Artikels wurden wiederum zehn solcher Gebäude ausgeführt, wobei bei diesen nur noch Portland-Zement zur Anwendung kam [Schlierholz 1870, S. 263].¹⁰⁰ Eines dieser Bauwerke stellt das von Bauinspektor Dollinger in der Deutschen Bauzeitung 1870 vorgestellte Bahnwärterhäuschen der „*derzeit in Ausführung begriffenen*“ Bahn zwischen Aulendorf und Sigmaringen dar (Abbildung 3.13).¹⁰¹ Auch dieses sowie ein bedeutender Teil der auf der Strecke erstellten Anlagen seien auf Anordnung von Joseph Schlierholz in Betonbauweise ausgeführt worden [Dollinger 1870, S. 44–45]. Die Vorteile des Baustoffs sah Schlierholz darin, dass insbesondere in natursteinarmen Gegenden eine Kosten- und Zeitersparnis zu verzeichnen sei, Materialengpässe weniger auftreten sowie jede Form hergestellt werden könne [Schlierholz 1870, S. 265].

Ein weiterer bedeutender Meilenstein war der Bau etlicher Arbeiterunterkünfte in der Kolonie Victoriastadt auf dem heutigen Stadtgebiet von Berlin.¹⁰² Die Bauweise wird in [N. N. 1872] beschrieben: Der Beton sei vornehmlich mit Zuschlägen aus Schlacke sowie Sand und zerschlagenen Kalksteinen zubereitet. Mit Wasser vermischt ergebe sich ein Brei, der in eine Schalung gegeben werde und zwar in einer Schichthöhe von etwa 0,66 m. Auch wenn die Häuser der Kolonie Victoriastadt in Berlin-Rummelsburg des Öfteren als Stampfbetonbauten bezeichnet werden, so berichtet ein unbekannter Autor 1872 in der Deutschen Bauzeitung: „*Gestampft wird dieser Béton nicht, sondern einfach mit der Schippe in Schichten von 0,60 bis 0,66 m Höhe eingefüllt und festgedrückt.*“ [S. 1872, S. 385]. Entsprechend wird die Bauweise in [N. N. 1872, S. 188] auch als „*Cementguß*“ und nicht als Stampfbeton bezeichnet, wenngleich beide Bauweisen insbesondere hinsichtlich des Materials große Ähnlichkeit aufweisen. Der größte Vorteil wurde in den Baukosten gesehen: Mit dem Zementguss könne eine Ersparnis von 50 % gegenüber der Ziegelbauweise erzielt werden [S. 1872, S. 385].

Weitere Versuche, den Beton im Häuserbau zu verwenden, gab es in Österreich. In Salzburg sei ein Haus komplett aus Beton gebaut worden, ohne dass Ziegel oder Steine verwendet worden seien [Haanen 1872, S. 297].¹⁰³ Aus Kostengründen habe man hydraulischen Kalk verwendet, weil Portland-Zement noch zu teuer war. Sowohl Wände und Gewölbe wie auch Treppen und Dachplatten seien hier aus Beton ausgebildet worden.

¹⁰⁰ Vgl. hierzu auch die ausführliche Zusammenstellung Schlierholz' aus dem Jahr 1876 mit 23 Tafeln zu ausgeführten Bauten auf Donau-, Allgäu- sowie Hohenzollern-Bahn [Schlierholz 1876].

¹⁰¹ Das dort abgebildete Häuschen sieht geringfügig anders aus als die Probebauten von Schlierholz. Des Weiteren bezieht er sich in seinem Text nicht auf die Ulm–Blaubeurener Strecke, wo die Versuchshäuschen erstellt wurden, sondern auf die Strecke Aulendorf-Sigmaringen. Es handelt sich also eindeutig um ein anderes Gebäude.

¹⁰² Es ist nicht klar, warum eine solche Siedlung in einem Gebiet gebaut werden konnte, wo tragende Konstruktionen aus Zement verboten waren. Versuchsbauten in Rummelsburg werden verschiedentlich beschrieben, z. B. in [S. 1872, S. 385] ebenso wie in [Kahlow 1999, S. 16], der sich auf [Lehmann 1872] bezieht: Es seien dort Belastungsversuche unter anderem bezüglich der Tragfähigkeit von Deckengewölben angestellt worden. Aus Beton hergestellte Gewölbe seien bedeutenden Belastungen ausgesetzt worden, ohne dass sich an der Unterseite Risse gezeigt haben [Lehmann 1872]. Es kann nur vermutet werden, dass eine Sondergenehmigung aufgrund der positiven Versuchsergebnisse erteilt wurde.

¹⁰³ Dieser Artikel erschien in ähnlichem Wortlaut in [N. N. 1873], so dass diese Versuche auch in Deutschland als bekannt gelten müssen.

Die Ergebnisse bewertete der Autor, der Ingenieur Edmund van Haanen, als so positiv,¹⁰⁴ dass er die Bauweise auch für Wien empfahl. Die dort herrschende Wohnungsnot fordere das „*eifrige Studium*“ der im Vergleich zum Ziegel kostengünstigeren Bauweise aus Beton [Haanen 1872, S. 295]. Dabei könne man sowohl „*billige Familienhäuser und Arbeiterwohnungen*“ als auch Landhäuser für die reicheren Klassen bauen [Haanen 1872, S. 298]. Die Donau biete für die benötigten Zuschläge eine unerschöpfliche Quelle [Haanen 1872, S. 298].

Ein weiterer Pionier auf dem Gebiet des Betonbaus war der Zementfabrikant Bernhard Liebold.¹⁰⁵ Im Jahr 1874 baute er für seine Arbeiter Häuser aus Beton. Auch er sprach von ausgedehnten Versuchen beim Bau dieser Wohngebäude, „*welche gleichfalls die Erwartungen hinsichtlich ihrer Festigkeit übertroffen und zu erweiterter Anwendung der neuen Baumethode geführt haben.*“ [Liebold 1875, S. 48]. Die Wände seien zwar aus Kalksand-Ziegel-Steinen ausgeführt, jedoch sämtliche Decken sowie bei einem Haus auch Dach, Treppen und Fußböden aus Zementbeton hergestellt worden [Liebold 1875, S. 48].¹⁰⁶ Der Bau weiterer Gebäude durch Bernhard Liebold folgte bis hin zum „Großprojekt“ für die Hoffmann’schen Stärkefabriken in Salzuflen, 1881, mit 22.000 m² Deckenkonstruktionen aus Stampfbeton [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 3].¹⁰⁷ Liebold trat nun verstärkt als Propagandist des Betons auf.¹⁰⁸ In einem 1880 publizierten, mehrteiligen Artikel über die Vorzüge des Betonbaus zählt er eine neun Punkte umfassende Liste an Vorteilen gegenüber anderen Bauweisen auf; die Vorzüge liegen

1. *„in der Schnelligkeit der Ausführung;*
2. *in der leichten und erfolgreichen Verwendung von gewöhnlichen Arbeitern zur Bereitung und Verwendung der Bétonmasse;*
3. *in dem verhältnismäßig geringen Verbrauch von Baumaterial und der Verwerthung aller sonst nicht allein unbrauchbaren, sondern auch oft lästigen Stein- und schlackenartigen Abfälle jeder Art;*
4. *in der beliebigen Wahl der Mauerstärken, welche Centimeter für Centimeter in jeder Dicke nach den Druckverhältnissen ausgeführt werden können, anstatt daß man, wie beim Ziegelbau, gezwungen ist, die Dicke immer um ein Bedeutendes ½ bis 1 Stein zu vermehren;*
5. *in der Zulässigkeit eines minder guten Baugrundes, weil die Bétonmauern in Folge ihrer Minimalstärken den Untergrund überhaupt weniger belasten und da sie eine*

¹⁰⁴ „Bruchstein- und Ziegelmauern, in welchen häufig durch nachlässigen Verband und mangelhafte Ausfüllung der Stossfugen Höhlungen vorkommen, bilden niemals einen so innig und dicht vereinigten Körper, als solches bei einer völlig compacten, dicht geschlossenen Wand aus Béton der Fall ist.“ [Haanen 1872, S. 297].

¹⁰⁵ Vgl. Kap. 4.5.

¹⁰⁶ Vgl. hierzu auch [Seeliger 2004, S. 49]. Matthias Seeliger fasst in seinem Artikel die Frühgeschichte der Zementfabrik in Vorwohle zusammen unter Einbeziehung zahlreicher Archivalien und Publikationen Liebolds.

¹⁰⁷ Ausführliche Aufstellung von größeren Bauten ab 1875 in [Schwering, Schlierholz 1881]. So ist z. B. der Bau eines viergeschossigen Wohnhauses für den Mitinhaber der Vorwohler Portland-Zementfabrik, F. Planck aus Grobmörtel-Mauerwerk in der Deutschen Bauzeitung 1877 beschrieben [Liebold 1877d]. Weitere Ausführungen in [Liebold 1880].

¹⁰⁸ Vgl. Kap. 4.5.

homogene stark zusammenhängende Masse bilden, partielle Senkungen kaum zulassen;

6. *in der überaus leichten und billigen Anlage von Rauch- und Ventilationsröhren;*
7. *in der großen Sicherheit der Mauern gegen Schlagregen und Feuchtigkeit überhaupt und in der hierdurch bedingten größeren Wärme der Wohnungen während der feuchtkalten Jahreszeiten;*
8. *in der großen Sicherheit gegen Gewürm und anderes Ungeziefer, welches sich in anderen Mauern hinter dem Putz dauernd einnistet oder die Mauern, namentlich solche von Bruchstein mit vielen und oft offenen Fugen, durchbricht;*
9. *in der auch bei feuchter Witterung vorhandenen ausreichenden Ventilation und in der schnellen Bewohnbarkeit der aus Béton hergestellten Gebäude.“*

[Liebold 1880, S. 106].

Trotz dem Liebold von der Eignung des Betons überzeugt war und diese auch bewiesen hatte, auch er sprach von den „*Bedenken, welche in Deutschland dieser Baumethode entgegen treten*“ [Liebold 1877d, S. 458]. Das Misstrauen gegen den Beton war in den Anfangsjahren nicht unbegründet: Unterschiedliche Hersteller lieferten unterschiedliche Produkte. Nicht selten wurden Zemente durch billigere Zusätze gestreckt, so dass deren mechanische Eigenschaften für die ausführenden Ingenieure nur schwer kontrollierbar waren.¹⁰⁹ In der Deutschen Bauzeitung wurde dieser Zustand als das „*herrschende (...) Chaos der verschiedenartigsten, meist unzureichenden oder geradezu falschen Prüfungsbestimmungen*“ [Schiffner 1886, S. 418] beschrieben. Erstmals im Jahr 1875 wurde die Forderung einiger Zementfabrikanten nach einer einheitlichen Zementprüfung laut¹¹⁰ [Emperger 1908a, S. 5].¹¹¹ In der Folge wurden solche Rahmenbestimmungen erarbeitet und von mehreren Instanzen, federführend durch den zwischenzeitlich gegründeten Verein Deutscher Cementfabrikanten,¹¹² geprüft und dem zuständigen preußischen Minister zur Annahme vorgelegt.¹¹³ Im November 1878 wurden die ersten

¹⁰⁹ Vgl. z. B. das Vorwort von Liebolds Monographie über den Betonbau. Zum Widerstand gegen die Betonbauweise schreibt er: „(...) es ist dies die Schuld deutscher Zementfabriken, weil, da sie ihre Manipulationen bislang immer mit dem Schleier des Geheimnisses zu umkleiden gewusst und sich darauf beschränkt haben, ihre Fabrikate in Farbe und Verhalten den englischen Zementen gleich herzustellen, anstatt dem Publikum und speciell den Technikern gegenüber durch Wort und Schrift offen die Resultate über die Eigenschaften und Festigkeiten ihrer Zemente (...)“ darzulegen [Liebold 1875, S. XI].

¹¹⁰ Z. B. auch Aussage von Dyckerhoff: Besonders in Norddeutschland herrsche ein fast unüberwindliches Misstrauen gegen Zementprodukte. „Um dieses zu beseitigen, müssten besonders die Zementfabrikanten sich die Aufgabe stellen, die Beschaffenheit eines guten Portland-Zementes festzustellen und anzugeben, woran man denselben sicher erkennt, und welches die genauen Bedingungen einer guten Verarbeitung sind.“ [Dyckerhoff 1875, S. 204].

¹¹¹ Hier ist eine ausführliche Beschreibung der frühen Geschichte der Zementprüfung enthalten [Emperger 1908a, S. 1–11].

¹¹² Der Verein entstand durch „Abspaltung“ einiger Zementfabrikanten aus dem „Deutschen Verein für Fabrikation von Ziegeln, Tonwaren, Kalk und Zement“ im Jahre 1877 [Dyckerhoff 1908, S. 89]. Ab dem Jahr 1888 wurde er umbenannt in „Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten“ [Dyckerhoff 1908, S. 91].

¹¹³ Rudolf Dyckerhoff schrieb in seinem Artikel zur Entstehung des Vereins, dass der Normenentwurf nicht nur in Preußen vorgelegt worden sei, sondern auch „an die Ministerien und Baubehörden der übrigen deutschen Bundesstaaten und an andere Interessenten des deutschen Bauwesens“ mit dem Ersuchen, diese einzuführen [Dyckerhoff 1908, S. 89].

BETON

deutschen „Normen für die einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Zement“ im Königreich Preußen eingeführt [Büsing 1892, S. 36–37].

Diese ersten Normen beinhalteten lediglich sechs Punkte [DMA, Sign. FA 010/267].¹¹⁴

1. Die Regelung der Verpackungsgrößen und -gewichte (Säcke und Tonnen) sowie deren einheitliche Beschriftung.
2. Bindezeit des Zements: Einteilung in langsam und raschbindend (Abbindezeit über bzw. unter einer halben Stunde). Meist sei langsam bindender Zement anwendbar, dieser sei leichter und zuverlässiger verarbeitbar sowie mit höherer Bindekraft versehen.
3. Volumenbeständigkeit des Zements sowie die dafür anzuwendende Prüfmethode: Erstellen eines auf glatter Fläche ausgegossenen Kuchens reinen Zements, der auch bei längerer Lagerung unter Wasser keine Verkrümmungen oder Kantenrisse zeigen darf.
4. Mahlfineinheit: Auf einem Sieb mit 900 Maschen/cm² darf höchstens 20 % Rückstand bleiben.
5. Zur Ermittlung der Bindekraft des Zements Prüfung der Zugfestigkeit eines Probekörpers mit 5 cm² Querschnitt.
6. Minimalzugfestigkeit von 10 kg/cm².

Weitere deutsche Staaten übernahmen diese Normen. Auch im Ausland, wie beispielsweise in Österreich,¹¹⁵ der Schweiz oder in Russland, seien sie als Grundlage für dort einzuführende Normen verwendet worden, berichtete Friedrich Wilhelm Büsing [Büsing 1892, S. 37]. Erst ab diesem Zeitpunkt begann der Durchbruch des Konstruktionsmaterials Beton¹¹⁶ im Hochbau und auch in Preußen wurden Stimmen laut, die den Einsatz von Beton wieder propagierten.¹¹⁷ Ein Beispiel dafür ist das folgende Zitat

¹¹⁴ Im Jahrgang 1877 der Deutschen Bauzeitung sind einige „Vorabdrucke“ sowie Kommentare usw. zu den Normen enthalten [s. beispielsweise N. N. 1877a; N. N. 1877b; Dyckerhoff 1877]. Die Originalvorschrift lag der Deutschen Bauzeitung lose bei und konnte deshalb nicht mehr beschafft werden, so dass mit der in einer Firmenschrift von Dyckerhoff & Widmann abgedruckten Fassung gearbeitet werden musste.

¹¹⁵ Die österreichischen Normen sind abgedruckt in [N. N. 1889].

¹¹⁶ Vgl. hierzu das folgende Zitat aus [Büsing 1892]: Büsing spricht vom Wasserzusatz als wichtigem Einflussfaktor auf die Güte des Stampfbetons, dann folgt: „Es darf indessen ein zweiter Faktor, von dem die Sicherheit für die Güte der Betonbauten wesentlich abhängt, nicht übergangen werden; es ist dies die gleichmässig gute Beschaffenheit des Portland-Cements, welche erst erlangt worden ist, seitdem man den Portland-Cement auf seine Haupteigenschaften prüfen gelernt hat, seitdem diese Prüfungen ständig geübt werden, und seitdem Normen bestehen, durch welche in die Fabrikation, den Handel, die Verarbeitung und Prüfung Einheitlichkeit gebracht worden ist. Es bedurfte des Vorangehens dieser Normen und des auf ihnen fussenden sicheren Weiterschreitens der deutschen Cement-Technik, um bauliche Aufgaben, wie sie solche bisher gelöst hat, mit Sicherheit für den Erfolg in Angriff nehmen zu können.“ [Büsing 1892, S. 75].

¹¹⁷ Vgl. z. B. [Peters 1898]. Ein weiteres Beispiel zur Einführung des Betons in Preußen stellt der Artikel von Paul Winter über Eisenbahnanlagen dar: „Die umfangreichen und erfolgreichen Anwendungen von Stampfbeton zu Streckenbauwerken jeder Art, wie sie z. B. in Oesterreich, Bayern und Württemberg schon seit längerer Zeit gestattet waren, sind wohl bekannt. Ich glaube nun, dass das süddeutsche Beispiel auch für norddeutsche Verhältnisse vielfach sehr nachahmenswert sein kann (...). Nach den vorstehend gegebenen Beispielen und den günstigen Erfahrungen, welche auch bei vielen grösseren Betonbauten, namentlich in Oesterreich und Ungarn, unter Verwendung von deutschem Portlandcement seit einer längeren Reihe von

eines unbekanntes Autors von 1884, der über den Brand in einem Fabrikgebäude schreibt. Dabei sei fast ein Drittel aller gusseisernen Stützen gesprungen. Nur wenn alle am Bau Beteiligten gemeinsam beraten, sei es möglich, dass die Baukunst voranschreite und nicht „verknöchere“, wie dies in Berlin teilweise der Fall sei: „Wir erinnern hierbei nur daran, dass die Anwendung des Zementbetons zu tragenden Konstruktionen hier noch ganz verboten ist, während in andern Städten ganze Häuser und auch in Deutschland weit tragende Brücken daraus hergestellt werden.“ [Bn. 1884, S. 158].¹¹⁸ Die Einführung der Normen und die damit verbundene Qualitätssteigerung des Portlandzementes waren der entscheidende Schritt in der Einführung des Betons als Baustoff für anspruchsvolle Bauten.¹¹⁹

3.2.4 Zement und Beton

Die Geschichte des Zements wurde vielfach beschrieben,¹²⁰ deshalb sollen hier nur die wichtigsten Eckpunkte wiederholt werden.¹²¹ Der vielfach zitierte und beschriebene John Smeaton betrieb zum Verhalten von hydraulischen Bindemitteln „planmäßig durchgeführte Forschungen“ [Quietmeyer 1911, S. 63] und überprüfte dabei die herrschenden Meinungen¹²² mittels eigener Versuche [vgl. Smeaton 1791, S. 102–123]. Dabei stellte er fest, dass nicht die Härte des Kalksteins entscheidend war, sondern die Zusammensetzung des Ausgangsmaterials: Eine innige Mischung von Kalkstein mit einem gewissen Anteil an Ton, die durch Brennen in Klinker verwandelt wird, verhält sich wie ein Zement, wobei hier unter Zement ein Bindemittel mit hydraulischen Eigenschaften zu verstehen ist. Das brachte Smeaton zu der Erkenntnis, ein solcher Anteil sei das sicherste Kriterium für die Eignung von Kalkmörtel für mit Wasser in Berührung stehende Bauten [Smeaton 1791, S. 108].¹²³ Vermutlich angeregt durch Smeatons Publikation [Quietmeyer

Jahren gemacht worden sind, wäre es erwünscht, wenn diese Bauweise auch in Preussen eine häufigere Anwendung fände.“ [Winter 1894, S. 426; S. 439].

¹¹⁸ Die historische Entwicklung des Betons im Bezug auf monolithische Brückenbogen wird in den Kapiteln 4.2 bis 4.5 betrachtet.

¹¹⁹ Vgl. „Die wissenschaftliche Behandlung des Betonbrückenbaues wie des Betonbaues überhaupt gehört erst den 80er Jahren an, nachdem man angefangen hatte, sorgfältige Untersuchungen über die Festigkeitseigenschaften des Betons anzustellen, die in bezug auf die elastischen Eigenschaften des Betons, sogar erst in allerneuester Zeit namentlich durch die Arbeiten von Bach's zu einem gewissen Abschluß gekommen sind.“ [Büsing 1905, S. 457].

¹²⁰ Vgl. beispielsweise [Quietmeyer 1911]; [Haegermann et al. 1964]; usw.

¹²¹ In der Antike und im Mittelalter wurden dem Kalk z. B. Puzzolane oder Trass zugesetzt, um ihn wasserfest zu machen. Vgl.: „Im Alterthum spielte die natürliche Puzzolane, im Mittelalter der Trass eine wichtige Rolle. Die Puzzolane ist eine Masse vulkanischen Ursprungs, graugelblich oder röthlichbraun, matt, von grossmuscheligen Bruch, die sich in grosser Menge zwischen Puzzoli und Neapel und bei Rom findet. Trass ist ein erdiges, schmutzgelbes, ins Graue und Braune spielendes, poröses, auch mehr oder weniger dichtes Mengniss, ebenfalls vulkanischen Ursprungs, welches u. a. an den Ufern des Rheins, besonders bei Andernach gewonnen wird. Beide Stoffe kommen entweder in Brocken, meist aber schon zum feinsten Staub gemahlen in Fässern in den Handel; werden aber seit jeher nur als Cement gebraucht; angemessene Theile des einen oder anderen werden nämlich dem fetten Kalke beigemischt, um ihn wasserfest zu machen, und dieser Mischung je nach dem Zwecke des Mörtels, eine angemessene Menge reinen Sandes zugesetzt.“ [Kutschera 1870, S. 300–301].

¹²² Die verbreitete Meinung war insbesondere, dass nur der weisseste oder härteste Kalkstein – also ohne Zusätze – den besten Kalk biete [Quietmeyer 1911, S. 63]. Vgl. auch [Smeaton 1791, S. 103].

¹²³ Original: „When a limestone is intimately mixed with a proportion of Clay, which by burning is converted into Brick, it is made to act more strongly as a Cement. – This suggested to me the idea, that an admixture of

1911, S. 65] suchte James Parker zum Ende des 18. Jahrhunderts nach tonhaltigen Kalkgesteinen, die er ebenfalls brannte, jedoch mit einer höheren Temperatur als beim fetten Kalk [Quietmeyer 1911, S. 66]. Nach dem Mahlen und vermischt mit Wasser ergab sich ein Mörtel, der unter Wasser innerhalb einer Stunde erhärtete [Quietmeyer 1911, S. 67]. Parkers Zement verbreitete sich rasch, auch über die Grenzen Englands hinaus, und beherrschte den Markt „*noch ziemlich unumschränkt in den 30er Jahren*“, als es bereits andere Arten von Bindemitteln gab [Quietmeyer 1911, S. 70]. Die bereits in Kap. 3.2.3 beschriebenen Forschungen von John und Vicat entwickelten zwar die künstliche Herstellung der Zemente weiter, der entscheidende Entwicklungsschritt zum Portlandzement ist jedoch in der Erkenntnis zu sehen, dass das Brennen entgegen des bis dahin ausgeführten Schwachbrandes bis zur Sinterung erfolgen müsse. Diese Erkenntnis schrieb Friedrich Quietmeyer Isaac Charles Johnson zu [Quietmeyer 1911, S. 117], auch wenn bereits William Aspdin bis zur Sinterung gebrannt hatte [Quietmeyer 1911, S. 70]. Nach Quietmeyers Einschätzung jedoch hatte Aspdin einen Zement sehr wechselhafter Qualität und nur teilweiser Sinterung, überwiegend jedoch im Schwachbrand hergestellt [Quietmeyer 1911, S. 111]. Des Weiteren bezweifelte Quietmeyer, Aspdin habe den Vorgang der Sinterung durchschaut oder gar bewusst ausgenutzt.¹²⁴ Johnson hingegen widmete sich der intensiven Erforschung von Mischungsverhältnissen wie auch der Brenntemperaturen [Quietmeyer 1911, S. 115–121]. Quietmeyers Fazit: *„Jetzt endlich sind die Hauptfordernisse für die Herstellung eines, den heutigen Begriffen von Portlandzement entsprechenden Produktes erfüllt, die Festsetzung einer nur noch wenig verbesserungsbedürftigen Rohmischung und der Grundsatz: ‚Brennen bis zur Sinterung‘. Und so ist das Jahr 1844, in dem Johnson seine Versuche abschloss (...) als das eigentliche Geburtsjahr des Portlandzementes anzusehen.“* [Quietmeyer 1911, S. 119].

In der Folge entwickelten sich zahlreiche Portlandzement-Fabriken, ab den 1850er Jahren auch in den deutschen Ländern. Wie in Kap. 3.2.3 bereits angedeutet war jedoch jeder Fabrikant für sein eigenes Produkt verantwortlich; weder Inhaltsstoffe, noch Brenntemperaturen noch Eigenschaften der Endprodukte waren vollumfänglich festgelegt und damit waren die Zemente nach wie vor nicht von einheitlicher Qualität. Auch in den ersten Normen aus dem Jahr 1878 wurde dazu keine klare Aussage getroffen. Und so wurde weiterhin mit verschiedenen Zumischungen experimentiert: Diese wurden einerseits zugegeben, um gewisse Eigenschaften¹²⁵ des Zements zu beeinflussen, andererseits gab es aber vermehrt auch Fälle, die billigere Zumischungen verwendeten, um ihren wirtschaftlichen Ertrag zu erhöhen. Oftmals verschlechterten diese Zusätze

Clay in the composition of limestone, when treated as above specified, might be the most certain index of the validity of a limestone for Aquatic Building.“

¹²⁴ Vgl.: „Offenbar war er ein begabter, aber jeder wissenschaftlichen Schulung barer Mann, der die geringen Kenntnisse der Zementtechnik, die er bis zu seinem 25. Jahre auf dem kleinen Werke in Wakefield erwerben konnte, weiter ausbildete, und dem es vielleicht gelungen ist, die Erfindung seines Vaters durch allmähliche Veränderung der Rohstoffmischung und durch nach und nach eingeführtes stärkeres Brennen dem näher zu bringen, was man heute unter Portlandzement versteht. Dass er zielbewusst bis zur Sinterung gebrannt oder eine solche angestrebt habe, ist nirgends gesagt; und manche Angaben sprechen gegen eine derartige Auffassung.“ [Quietmeyer 1911, S. 114]. Vgl. auch die Aussage Quietmeyers, dass Aspdin „die chemischen Vorgänge beim Brennen keineswegs klar durchschaute.“ [Quietmeyer 1911, S. 116].

¹²⁵ Z. B. Festigkeit, Abbindezeit, Wasserdichtigkeit, usw.

jedoch die Qualität des Zements.¹²⁶ In einer Notiz in der Deutschen Bauzeitung von 1882 beschreibt ein ungenannter Autor: „Die vor etwa zwei Jahren gemachte bekannte Entdeckung, dass Portland-Zement Zusätze von einigen fein gemahlten Körpern, als etwa Kreide, verschiedene Farben, Kalkstein, Trass etc., in gewissen Antheilen verträgt, ohne an seiner Festigkeit Schaden zu nehmen, scheint für einige deutsche Fabriken zu verführerisch gewesen zu sein, um der Versuchung widerstehen zu können, auf billigere Weise ein Fabrikat zu produziren und in den Handel zu bringen, bei welchem der Name Portland-Zement der wirklichen Zusammensetzung nur zum Theil entspricht. Grosser Beliebtheit erfreut bei der Fälschung sich Hohofenschlacke.“ [N. N. 1882, S. 328].¹²⁷ In den folgenden Jahren entbrannte eine hitzige Diskussion um diese sogenannte „Zumisch-Frage“¹²⁸ [Fresenius, Fresenius 1885, S. 6].¹²⁹ Diese war auch Gegenstand der Generalversammlung des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten im Jahr 1885: Im Ergebnis erarbeitete der Verein eine Erklärung,¹³⁰ mit der sich die Zementfabrikanten¹³¹ verpflichteten, nur reine Produkte unter dem Namen Portland-Zement zu verkaufen [N. N. 1885b, S. 178–179]. Die dort aufgestellte Begriffsdefinition für den Portland-Zement fand auch Einzug in die grundlegend überarbeiteten Normen des Jahres 1887 [N. N. 1887b, S. 400].¹³²

¹²⁶ Bereits 1880 schrieb Ludwig Erdmenger bezüglich Zusatzstoffen: „Jede Beimengung eines indifferenten Materials zum Portlandzement-Mörtel schwächt an sich dessen Kraft.“ [Erdmenger 1880, S. 461].

¹²⁷ Vgl. auch „Ursprünglich handelte es sich um einen mehr oder weniger hohen Zusatz von gewöhnlicher fein gemahlener Hohofenschlacke, einem geringwerthigen Material (...): eine einfache und billige Volumen-Vermehrung, welche zu dem viel höheren Preise des wirklichen Zements an den Käufer gebracht wurde. Der lockende hohe Gewinn veranlasste mehrere Fabriken, bzw. Händler, von dieser Zumischung im ausgedehntesten Maasse Gebrauch zu machen und es ist Thatsache, dass dieselbe an manchen Stellen auch bis heute weiter geübt wird.“ [Fresenius, Fresenius 1885, S. 6].

¹²⁸ Z. B. wird die Debatte auch im Protokoll der Generalversammlung des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten aus dem Jahr 1885 mit „Zumischfrage“ bezeichnet [N. N. 1885b, S. 178], so dass man von einem gebräuchlichen Begriff ausgehen kann.

¹²⁹ Die Bauzeitschriften insbesondere in den Jahrgängen 1879–1886 sind voll von diesbezüglichen Abhandlungen und Notizen. Vgl. z. B. [Dyckerhoff 1879]; [Erdmenger 1880]; [Lehmann 1880]; [Lange 1881]; [Dyckerhoff 1881b]; [Böhm 1881]; [N. N. 1881a]; [N. N. 1882]; [N. N. 1883b]; [N. N. 1883a]; [P.K. 1883]; [B. 1883]; [Frühling 1883]; [B. 1884]; [Der Vorstand des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten 1884]; [Tetmajer 1884]; [Temajer 1885]; [N. N. 1885]; [Schumann 1886b]; [Bosse 1886]; [Schumann 1886a] usw. usf.

¹³⁰ „Erklärung. Die unterzeichneten Fabriken sehen sich veranlasst, gegenüber der Thatsache, dass bereits seit mehren Jahren verschiedene Zementfabriken dem Portland-Zement nach dem Brennen fremde Körper zumischen und diese Mischung trotzdem unter dem Namen ‚Portland-Zement‘ in den Handel bringen, nachstehende Erklärung abzugeben: 1. Portland-Zement ist ein Produkt, entstanden durch innige Mischung von kalk- und thonhaltigen Materialien, als wesentlichsten Bestandtheilen, darauf folgendem Brennen bis zur Sinterung und Zerkleinerung bis zur Mehlfeinheit. 2. Jedes Produkt, welches auf andere Weise entstanden ist, als ad 1 angegeben oder welchem während oder nach dem Brennen fremde Körper beigemischt sind, ist nicht als Portland-Zement zu betrachten und der Verkauf derartiger Produkte unter der Bezeichnung ‚Portland-Zement‘ ist als eine Täuschung des Käufers anzusehen. 3. Die von anderer Seite behauptete Verbesserung der Zug- und Druckfestigkeit von Zement durch Zuschläge, Kompositionen usw. ist um dessentwillen in dieser nicht als entscheidend zu betrachten (...) 4. Das Verfahren der Mischung ist geeignet das Vertrauen des Publikums zu dem Portland-Zement vollständig zu erschüttern, da dasselbe nicht im Stande ist, den Grad der Zumischung und die Qualität des zugemischten Stoffes zu erkennen und zu prüfen. 5. Die unterzeichneten Fabriken verpflichten sich unter einander und gegenüber ihren Abnehmern nur solche Waare unter dem Namen Portland-Zement zu verkaufen, welche den Bestimmungen aus sub 1 dieser Erklärung entspricht.“ [N. N. 1885b, S. 178–179].

¹³¹ Jedoch nur die Mitglieder des Vereins.

¹³² Spätere Definitionen sind noch präziser. In der vierten Ausgabe von Büsings Portlandzementmonographie findet sich folgende Definition, die beinahe wortgleich in den Normen von 1909 auftaucht: „Portland-Zement ist ein hydraulisches Bindemittel mit nicht weniger als 1,7 Gewichtsteilen Kalk (CaO) auf 1 Gewichtsteil

Verallgemeinerungen bezüglich der Eigenschaften des Zements zu treffen ist nahezu ausgeschlossen. Letztlich ist jedoch festzustellen, dass es eine Unmenge an Materialprüfungen gab: Bekannt sind Proben von Fabrikanten bezüglich ihrer eigenen Produkte,¹³³ aber es gab auch „unabhängige“ Versuche von Personen bzw. Institutionen, die Zement aufkauften und beprobten.¹³⁴ Die Prüfungen betrachteten zahlreiche Eigenschaften des Zements, wie z. B. Volumenbeständigkeit, Festigkeiten (Zug/Druck) unter Wasser bzw. an der Luft, Wasserdurchlässigkeit, Erhärtung, Ergiebigkeit bei der Mörtelbereitung, Kosten usw.

Die unzähligen Ergebnisse, Mitteilungen und zugehörigen Erwiderungen auch nur ansatzweise wiederzugeben, ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Interessant scheint jedoch, dass bereits früh die hohe Wichtigkeit der Mahlfeinheit des Zementes bekannt war. Während Liebold in seiner Monographie von 1875 noch beschreibt, die Feinheit und Gleichmäßigkeit des Zementes sei am besten auf einem Sieb mit 20 Maschen pro Quadratzentimeter¹³⁵ zu prüfen und die Probe solle hierbei keine Rückstände hinterlassen [Liebold 1875, S. 14], präzisiert Wilhem Michaëlis in einer Abhandlung aus der Deutschen Bauzeitung 1876, dass ein gewisser Anteil im Portland-Zement wirkungslos bleibe und dass die Größe dieses Anteils von der Mahlung abhängt [Michaëlis 1876, S. 114]. Bei Anwendung eines Siebes mit 900 Maschen pro Quadratzentimeter bleibe ein Rückstand von 20 bis 40 % und von diesem wiederum seien rund vier Fünftel wirkungslos [Michaëlis 1876, S. 114]. Wenn man nun aber den Zement aufteile in den Feinanteil und den groben Anteil, der im Sieb zurückgeblieben sei, und diese Anteile jeden für sich zu Mörtel verarbeite, so sehe man, dass der grobe Zement einen sehr untergeordneten Mörtel ergeben, der feine jedoch einen vorzüglichen [Michaëlis 1876, S. 114–115]. In den Normen von 1878 war dann bereits eine Festlegung zur Mahlfeinheit enthalten.¹³⁶ 1880 bemerkte Liebold in seinem Gutachten über den Betonbau, viele Fabriken legen seinerzeit noch keinen Wert auf eine feine Mahlung. Die Festigkeit des Vorwohler Zements sei deshalb höher als bei anderen Produkten, weil er den Zement so lange mahle, bis er auf einem Sieb mit 5000 Maschen pro Quadratzentimeter nur noch einen geringen Rückstand hinterlasse

lösliche Kieselsäure (SiO_2) + Tonerde (Al_2O_3) + Eisenoxyd (Fe_2O_3), hergestellt durch feine Zerkleinerung und innige Mischung der Rohstoffe. Brennen bis mindestens zur Sinterung und Feinmahlung.“ [Büsing 1912, S. 14].

¹³³ Z. B. Vorwohler Zementfabrik in [N. N. 1882]. Vgl. z. B. auch Stegmanns Betrachtung zur Forschungs- und Entwicklungsarbeit der Firma Dyckerhoff & Widmann [Stegmann 2014, S. 64–72]. Vgl. auch die Aussage Rudolf Dyckerhoffs, er habe sich Schlacke verschafft und seinen Zement damit versetzt und beprobt. Dabei habe er herausgefunden, dass der Zement sich dadurch verschlechtere [Dyckerhoff 1908, S. 90].

¹³⁴ Z. B. die Materialprüfanstalten (bsp. Berlin-Charlottenburg, München. Von beiden genannten Anstalten erschienen in regelmäßigen Abständen Mitteilungshefte, die die Ergebnisse veröffentlichten); vgl. auch [Schumann 1886b]. Büsing schreibt in der Einführung in seiner Portland-Zement-Monographie, auch der Verein deutscher Zementfabrikanten, namentlich der Vorstand, übe eine scharfe Kontrolle über die Mitgliedsfabriken aus [Büsing 1892, S. 7]. Oder deutlich später: Im Centralblatt der Bauverwaltung berichtet ein ungenannter Autor „G.“ im Jahr 1906, dass von allen Vereinsmitgliedern Zement aufgekauft und geprüft worden sei. Von 84 Proben seien lediglich zwei geringfügig unterhalb der Normengrenze geblieben. Alle Zemente seien als volumenbeständig und frei von Beimischungen befunden worden. Die Frage der Zumischung von Hochofenschlacke stehe jedoch noch immer auf der Tagesordnung [G. 1906, S. 126].

¹³⁵ Ebenso in [Michaëlis 1869, S. 224]. Vermutlich bezieht Liebold seine Information aus genannter Quelle, er verweist aber nicht ausdrücklich darauf.

¹³⁶ Vgl. Kap. 3.2.3: Dort festgelegt wurden höchstens 20 % Rückstand bei 900 Maschen/cm².

[Liebold 1880, S. 36].¹³⁷ Und bereits im Rahmen der Debatte um die Zumischungen wurde in der Generalversammlung des Vereins deutscher Zementfabrikanten festgestellt: „*Wer die Zugfestigkeit¹³⁸ seines Fabrikats erhöhen wolle, setze demselben staubfein gemahlene Zement zu, d. h. man mahle überhaupt feiner. Das sei zwar theurer, aber auch bei weitem wirkungsvoller; es sei reell und ehrlich, während alle anderen Zusätze unvermeidlich zum Betrug und zur Fälschung führen.*“ [N. N. 1885b, S. 179]. Innerhalb sehr weniger Jahre griff diese Erkenntnis also Fuß.

Auch bei der Herstellung von Beton gab es keine vorgeschriebenen Rezepturen.¹³⁹ Bekannt ist, dass sowohl die Pioniere des Betonbaus als auch die später tätigen Ingenieure umfangreiche Versuche diesbezüglich ausgeführt haben.¹⁴⁰ Die Mischung der Bestandteile hatte vorrangig zweierlei Anforderungen zu entsprechen: ausreichende Qualität des Betons hinsichtlich Festigkeit und sonstiger notwendiger Eigenschaften sowie die Minimierung der Kosten, also der geringstmögliche Verbrauch an Zement.¹⁴¹ Beide Gesichtspunkte erforderten die Zulassung möglichst weniger Hohlräume zwischen den Zuschlägen. Deshalb sollten möglichst alle Korngrößen und -formen in der Mischung vorhanden sein [Büsing 1892, S. 124]. Angaben der Korngrößen sind interessanterweise oft nicht in absoluten Millimeter-Angaben, sondern in vergleichenden Größen wie Walnüsse oder Hühnereiern angegeben.¹⁴² Entgegen der heute üblichen Praxis wurden

¹³⁷ Vgl. auch die Aussage zur Vorwohler Portland-Zementfabrik: „Die Firma legt neuerdings mit Recht grosses Gewicht auf feine Mahlung.“ [N. N. 1879, S. 344].

¹³⁸ Bereits Clément Louis Treussart hatte seinen Mörtel nicht mittels Druckproben untersucht, sondern mit Biegeproben (Beschreibung des Versuchsaufbaus [Treussart 1829, S. 24], Versuchsergebnisse im weiteren Verlauf der Monographie). Die Festigkeitsermittlung von Zement bzw. Mörtel stellte die Ingenieure vor große Herausforderungen [ausführlich in Michaëlis 1869, S. 223–268]. Vicat testete beispielsweise mit einer Vorrichtung zur Messung der Nadeleindringtiefe. Dabei wurden die Schläge gezählt, die man benötigte, um die Nadel in eine gewisse Tiefe in die Probe einzuschlagen. Ein genaues Ergebnis konnte damit aber nicht ermittelt werden [Michaëlis 1869, S. 233]. Andere Tests beinhalteten das horizontale Aneinanderkleben von Ziegeln an eine Wand mittels Mörtel. Hierbei war die Anzahl der Ziegel entscheidend, bei der die Vorrichtung einstürzte [Michaëlis 1869, S. 236–237]. Zunächst setzten sich dann Zugfestigkeitsproben durch: Diese waren noch einfacher durchzuführen als Druckproben. Zudem war man der Meinung, dass man aus der Zug- einen direkten Rückschluss auf die Druckfestigkeit ziehen könne [Dyckerhoff 1878, S. 29]. Weiterhin war nach Meinung Dyckerhoffs nicht die Festigkeit des Zements, sondern dessen Bindekraft an die Zuschläge zur Qualitäts-Bewertung maßgebend [Dyckerhoff 1877, S. 182]. Bereits 1880 jedoch schreibt Rudolf Dyckerhoff, die Druckfestigkeit sei allein maßgebend für den Vergleich von Mörteln aus verschiedenen Materialien [Dyckerhoff 1880, S. 120]. Und 1881 formuliert er: „Ich benutze deshalb bei Vergleichen verschiedener Mörtel immer die Druckfestigkeit.“ [Dyckerhoff 1881a, S. 262]. Bei der ersten Überarbeitung der Zementnormen wurde diese Frage diskutiert. Das Ergebnis war eine Änderung der Normen dahingehend „dass als entscheidende Probe (...) die Probe auf Druckfestigkeit eingeführt wird und die bisherige Probe auf Zugfestigkeit in der Form der blossen Kontrolprobe aufrecht erhalten bleibt.“ [N. N. 1884a, S. 323].

¹³⁹ Vgl. beispielsweise auch die frühe Aussage von Lebrun, die Erfahrung müsse zur Führerin dienen (vgl. Kap. 3.2.3).

¹⁴⁰ Vgl. z. B. zu François Coignet: Die Qualität eines Betons hänge von der Verdichtung ab. „Von diesem Princip ausgehend, hat er die Verhältnisse studirt, welche in Bezug auf die Mischung des Kalkes oder Cements, des Wassers und des Sandes, je nach der Quantität von jedem dieser Stoffe, beobachtet werden müssen, und da ihm diese jetzt bekannt sind, so erklärt er, nicht bloß von Materialien gewöhnlicher Qualität, sondern auch von sehr mittelmäßigen, die man bei der Anfertigung des Betons auf die gewöhnliche Weise gar nicht berücksichtigen kann, gutes Mauerwerk herzustellen.“ [N. N. 1865b, S. 2].

¹⁴¹ Vgl. hierzu auch die bereits besprochenen Versuche von Prochnow zur Minimierung des Kalkbedarfs beim Kalksandpisé in Kap. 3.2.2. Eine ausführlichere neuere Betrachtung dieses Aspekts findet sich in dem Artikel „Zur Frage der Wirtschaftlichkeit der Betonverwendung“ [Biedermann 1904]. Weiterführung in [Brabandt 1907b]. Vgl. auch [Büsing 1892, S. 125–126].

¹⁴² Z. B. Korngrößen bei Brücke in Erbach „Wallnuss- bis Hühnerei-Grösse“ [N. N. 1892].

auch größere Steine verwendet, diese wurden allerdings nicht vorab in den Beton eingemischt, sondern in das Bauteil eingelegt und mit Beton umgeben.¹⁴³ Erst mit den umfangreichen wissenschaftlichen Untersuchungen von William Barnard Fuller und Sanford Eleazer Thompson zu den „*Laws of Proportioning Concrete*“, die im Jahre 1907 in den Berichten der American Society of Civil Engineers veröffentlicht wurden, wurde die theoretisch ideale Sieblinie für die dichteste Packung von Korngrößen bekannt [Fuller, Thompson 1907]. Bis heute basieren Beton- und andere Mischungen auf der oft auch nach ihrem Entwickler benannten Fullerkurve.

Hinsichtlich der Mischungsverhältnisse ist festzustellen, dass die Unternehmer abhängig von den unterschiedlichen Anforderungen und Rahmenbedingungen ihre Mischungen selbst festlegten¹⁴⁴ und selbst beprobten.¹⁴⁵ Bei der Mischung besonders zu beachten war die Angabe der Bestandteile in Raum- bzw. in Gewichtsteilen. Einfacher abzumessen war sicherlich der Raumteil, denn hierbei wurden Gefäße verwendet, die dann jeweils gefüllt und auf dem Mischplatz entleert wurden. Die Mischung konnte dann direkt auf der Holzpattsche stattfinden.¹⁴⁶ Diese Art der Abmessung hatte jedoch deutliche Nachteile: Je nachdem wie dicht die Bestandteile im Gefäß lagerten, war der Anteil sehr ungenau abzumessen.¹⁴⁷ Dennoch kann man davon ausgehen, dass aufgrund der Einfachheit des Verfahrens größtenteils das Abmessen nach Raumteilen verwendet wurde. In den Allgemeine Bestimmungen für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Bauten aus Stampfbeton aus dem Jahre 1908 wird jedoch darauf hingewiesen, dass der Zement nicht in das Maßgefäß eingerüttelt werden solle, sondern lose eingeschüttet. Des Weiteren solle die Füllung stets in der gleichen Weise bewirkt werden, damit die Bestandteile möglichst

¹⁴³ Vgl. „Um Material zu sparen, bringt man größere Stücken von Steinen oder Ziegeln in die Mitte der Mauer und bedeckt dieselben vollständig mit Concret.“ [Weber 1870, S. 61]. Vgl. auch das bereits in Kap. 2.2 verwendete Zitat von [Büsing 1892, S. 71]. Vgl. [Büsing 1892, S. 124]. Vgl. „Größere druckfeste Steine können in Mengen bis zu 40 vH. in den Beton eingebettet werden (...)“ [Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1908, S. 15]. Gemäß Büsing sei jedoch darauf zu achten, dass große Steinbrocken nur in Bereichen angeordnet werden, die wenig oder gar nicht unter Spannung stehen. Aus ökonomischer Sicht könne die Verwendung jedoch empfehlenswert sein, wo der Betonkörper nur tote Masse sei. Bei unter Spannungen stehenden Bauteilen müssen größere Steinbrocken mindestens um das Maß der größten Abmessung des Steins von der Außenkante entfernt gehalten werden [Büsing 1892, S. 130].

¹⁴⁴ Vgl. beispielsweise noch in den Bestimmungen von 1908: „Dem Bewerber soll – soweit nicht etwa besondere Vorschriften des Bauherrn oder behördliche Bestimmungen dem entgegenstehen – volle Freiheit gewährt sein in der Auswahl und in der Zusammensetzung der Baustoffe (...)“ [Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1908, S. 7]. Für die Herstellung des Betons lassen sich keine Regeln allgemeiner Gültigkeit aufstellen, „weil die Wahl des einzuschlagenden Verfahrens außer durch die Art und den Zweck des herzustellenden Betonkörpers auch beeinflusst wird durch die Beschaffenheit der Baustoffe, das Mischungsverhältnis, die Mischweise (Hand- oder Maschinenbeton), die Art der Betonmasse (erdfeucht oder weich), den Wärmegrad, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft, die Erfahrungen und Arbeitsgewohnheiten des Unternehmers.“ [Deutscher Beton-Verein 1905, S. 15].

¹⁴⁵ Vgl. „Wir verarbeiten kein Material, das wir nicht zuvor auf seine Güte, durch Vornahme von Zugproben mit der zu verarbeitenden Mörtel-Mischung, erford. F. auch durch Druckproben mit Beton-Mischungen untersucht haben. (...) Aufgrund der gefundenen Ergebnisse der Mörtel- und bezw. Beton-Untersuchungen bestimmen wir jeweils das Mischungs-Verhältnis.“ [Dyckerhoff 1888, S. 242].

¹⁴⁶ Vgl. Kap. 5.2.

¹⁴⁷ Vgl. beispielsweise: „Ich bemerke hierbei, dass es sich nicht empfiehlt, den Zement abzumessen; denn je nachdem derselbe in das Maßgefäße rascher oder langsamer eingefüllt wird, sackt er mehr oder weniger zusammen, so dass man meistens sehr verschiedene Mengen erhält.“ [Dyckerhoff & Widmann AG 1888, S. 3]. Vgl. auch [Büsing 1892, S. 123].

immer dieselbe Dichtigkeit der Lagerung im Gefäß annehmen können [Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1908, S. 14].

Ein weiteres Kriterium bei der Betonherstellung war der Wasserzusatz. Stampfbeton wurde anfänglich in erdfeuchter Konsistenz¹⁴⁸ verwendet und mittels Stampfern stark verdichtet, bis sich an der Oberfläche Wasser absetzte.¹⁴⁹ Dies war das Zeichen, dass der Beton ausreichend verdichtet war. Zu feuchter Beton hatte einen höheren Hohlraumgehalt als derjeniger mit geringerem Feuchtigkeitsgehalt, da das Wasser beim Verdunsten leere Poren hinterließ, was in der Folge zu einer niedrigeren Festigkeit führte [Burchartz 1902, S. 607]. Des Weiteren machte ein zu feuchter Beton das Stampfen unmöglich, da das Material von vornherein zu breiig war, um den Stampfern standzuhalten – eine ausreichende Verdichtung konnte dann nicht erreicht werden [Burchartz 1902, S. 607].

Insbesondere ab der Jahrhundertwende gab es bezüglich der Konsistenz des Betons wieder vermehrte Diskussionen – sicherlich auch veranlasst durch das Aufkommen des Eisenbetons, bei dem der erdfeuchte Beton und das Stampfen zu bautechnischen Problemen führte.¹⁵⁰ Ausführliche Probereihen zum Wassergehalt folgten.¹⁵¹ Der Direktor der Stuttgarter Zementfabrik Blaubeuren, Anton Hoch, beschrieb in einem Vortrag vor dem Verein deutscher Ingenieure durchgeführte Versuche zu Beton in erdfeuchter, plastischer sowie weicher Konsistenz [Hoch 1904b]. Ausgeführt wurden die Versuche von der benannten Zementfabrik sowie in Biebrich von Dyckerhoff & Widmann. Der erdfeuchte Beton erhielt so wenig Wasser, dass er gerade noch mit den Händen geballt werden konnte. Der plastische Beton erhielt rund 50 % mehr Wasserzusatz und der weiche Beton wurde so angesetzt, dass er breiig und nicht mehr stampffähig wurde [Hoch 1904b, S. 1461]. Die so hergestellten zahlreichen Probekörper wurden Festigkeitsproben unterzogen. Hoch stellte fest, dass die Frage, ob nun erdfeuchter, plastischer oder weicher Beton der beste sei, nicht abschließend beantwortet werden könne, die Ergebnisse seien jedoch wie folgt zusammengefasst: „1) Mit erdfeuchtem Beton erzielt man eine höhere Festigkeit als mit plastischem, 2) mit plastischem Beton eine größere Sicherheit als mit erdfeuchtem, während 3) nasser, sogenannter weicher Beton kein Stampfbeton mehr ist, sondern ein Beton, der nur in besondern Fällen Anwendung findet, dessen Beurteilung daher einer besondern Prüfung unterliegt.“ [Hoch 1904b, S. 1462].¹⁵² In der Folge empfiehlt er bei Vorhandensein gewisser Randbedingungen wie gute Maschinen, eingübte Arbeiter, die unter guter Aufsicht stehen, sowie kühlen Außentemperaturen den erdfeuchten Beton. Treffe dies nicht zu, sei der plastische Beton vorzuziehen [Hoch 1904b, S. 1463].

¹⁴⁸ Vgl. beispielsweise die Monographie von Mihálik zum Betonbau. Dort beschreibt er auch die Herstellung von Mörtel und Beton. In diesem Rahmen merkt er an, dass falls der Mörtel etwas trocken scheinen sollte, man sich dennoch vor dem Zugießen von Wasser hüten solle, da dies den Mörtel verderbe [Mihálik 1858, S. 113].

¹⁴⁹ Vgl. beispielsweise [Burchartz 1902, S. 607].

¹⁵⁰ Vgl. beispielsweise: „Wenn nicht gestampft wird, ist dagegen der feuchtere Mörtel im Vorzuge, weil derselbe sich dichter als der trockene lagert. Insbesondere ist aus diesem Grund auch bei Eisenbeton ein höherer Wasserzusatz zu geben als bei Stampfbeton.“ [Büsing 1912, S. 345].

¹⁵¹ Vgl. dazu beispielsweise die Untersuchungen von Bachs [Bach 1903a]; [Bach 1903b]; [Bach 1906]; [Bach 1909]. Vgl. [Burchartz 1902]. Vgl. [Brabandt 1907a] usw.

¹⁵² Vgl. auch „Plastischer Beton gibt größere Zuverlässigkeit, erdfeuchter höhere Festigkeit.“ [Leibbrand 1906a, S. 611].

Bei den im Rahmen vorliegender Arbeit vorwiegend betrachteten Konstruktionen kann man zu einem weit überwiegenden Teil von erdfeuchter Konsistenz des Betons ausgehen. Noch 1912 in der vierten Auflage seiner Monographie zum Portlandzement und seinen Anwendungen bemerkt Büsing, aus grobem Korn angemachter Mörtel oder Beton müsse, um dicht zu werden, einen geringen Wasserzusatz erhalten und gestampft werden [Büsing 1912, S. 345].

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass in der Bemessung von Bauwerken und insbesondere bei der Berechnung der in dieser Arbeit fokussiert betrachteten Brücken Spannungen an verschiedenen Stellen des Baukörpers ermittelt wurden. Die gewählten Baustoffe mussten diesen Spannungen entsprechende Eigenschaften aufweisen. Insofern ist beispielsweise bei einer Stampfbetonbrücke standardmäßig davon auszugehen, dass immer verschiedene Mischungen für Bogen, Widerlager, Füllbeton usw.¹⁵³ verwendet wurden.¹⁵⁴ Die Herstellungsweise des Betons – Wahl der Bestandteile, Mischungsverhältnis, Hand- oder Maschinenherstellung, Konsistenz, usw. – wurde vom Unternehmer eigenständig festgelegt. Insofern ist bei der heutigen Beurteilung von derartigen Bauwerken immer eine Beprobung der Baustoffe notwendig, eine allgemeine Aussage zu den Materialeigenschaften lässt sich nicht treffen.¹⁵⁵

¹⁵³ Vgl. z. B. Abbildung 5.65, Abbildung 7.21 (die Buchstaben im Plan bedeuten unterschiedliche Mischungsverhältnisse, vgl. [Büsing 1905, S. 481]), Abbildung 7.29, Abbildung 8.34, Abbildung 8.41. Solche verschiedenen Mischungsverhältnisse innerhalb eines Bauwerks sind in unzähligen Planunterlagen überliefert.

¹⁵⁴ Teilweise sogar innerhalb eines Bauteils, wie beispielsweise beim Bogen der Erbacher Brücke: „Zu dem Bogen ist Portland-Cement in der Mischung 1 Theil Cement, 1 Theil Sand, 3 Theile gut gewaschener Kies, von Wallnussgröße verwendet worden. Diese Zusammensetzung wurde nach den Widerlagern zu auf 1 Th. Cement, 1,25 Th. Sand und 4 Th. Kies, bzw. 1 Th. Cement, 1,5 Th. Sand und 5 Theile Kies (von Hühnergröße) gemagert. Zu den Widerlagern ist Romancement benutzt worden, aus 1 Th. Cement, 2 Th. Sand und 6 Th. Kies, in welche Mischung noch 1,5 Th. Kalksteinbrocken bis 20 kg Schwere eingebettet wurden. An den sichtbaren Flächen wurde die Korngröße des Kieses geringer genommen.“ [Büsing 1892, S. 259–260].

¹⁵⁵ Vgl. dazu die ausführliche Betrachtung zum heutigen Umgang mit Stampfbetonbrücken in Kap. 8.

4 DER MONOLOTHISCHE BOGEN¹⁵⁶

Um die Wende vom 18. zum 19. Jahrhundert erlebte der Pisébau eine Renaissance. Geringe Kosten, einfache Ausführbarkeit und Feuersicherheit verhalfen dem Bauen mit Lehm insbesondere in ländlichen Gebieten zum Aufschwung. Auch in Deutschland wurde die Technik angewandt. Es war naheliegend, dass man nicht nur die Wände, sondern in der Folge auch die Decken feuersicher und kostengünstig erstellen wollte. Das vorliegende Kapitel zeigt diese Entwicklung auf – von den frühen Gewölben im Hochbau bis hin zu den ersten monolithischen Bogenbrücken.

4.1 Die Entwicklung des monolithischen Gewölbes im Hochbau

Frühe Versuche, Decken mittels Lehm zu erstellen werden bereits in den Lehrbüchern über den Pisébau beschrieben. So ist in *„Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande“*, der deutschen Übersetzung der *„École d'architecture rurale“* von François Cointeraux [Cointeraux 1790] von den Gewölben aus Pisé die Rede: Gebaut wurden diese Gewölbe allerdings aus Pisé-Formsteinen, die in eigens dafür hergestellten Modellen vorgefertigt wurden [Cointeraux 1794, S. 34–35; Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2]. Den Bau eines solchen Gewölbes bezeichnete Cointeraux als ziemlich leicht, *„wenn man bei ihrer Anlage zusammengesetzte Krümmungen vermeidet und sich an die einfachen hält; das heißt, an diejenigen, welche mit einer einzigen Zirkelöffnung gezeichnet werden (...)“* [Cointeraux 1794, S. 34]. Bei diesen Gewölbeformen seien die Formsteine alle gleich und deshalb sehr einfach herzustellen [Cointeraux 1794, S. 34]. Diese Art des Piségewölbes wurde wohl auch in Deutschland hergestellt, als verbreitete Bauart kann es jedoch nicht gewertet werden.¹⁵⁷

Versuche, Pisé-Gewölbe monolithisch herzustellen, scheiterten an der Festigkeit des Materials. Bereits in seiner Abhandlung aus dem Jahr 1795 beschrieb Ernst Samuel Heinrich Böthcke zur Vereinfachung der Herstellungsweise Versuche eines Rittmeisters zu Orlowo, Gewölbe aus Lehm direkt auf der Schalung zu verfertigen, *„die aber, wie wohl vorher zu sehen war, sobald die Lehm-Masse trocken wurde, und die Schachtbogen weggenommen waren, sich zusammen drückten, spalteten, dennoch aber nicht ganz einfielen, vielmehr sich noch jetzt erhalten.“* [Böthcke 1795, S. 25]. Karl Held beschrieb in seinem 1808 publizierten Buch zum Pisé eine Möglichkeit, Kellergewölbe auf Erdschalung auszuführen [Held 1808, S. 52], jedoch ist nicht davon auszugehen, dass er ein solches wirklich ausführen ließ.¹⁵⁸ Den Vergleich von Gewölben aus Pisé-Steinen sowie aus monolithisch, auf Schalung gestampftem Lehm beschrieb Erdmann Friedrich Senff in seinem 1812 erschienenen Buch zum Pisé-Bau: Mit beiden Bauarten hatte er jeweils ein kleines Gebäude einschließlich eines entsprechenden Daches errichten lassen. Seine Erfahrungen bezüglich des Gewölbes beschrieb er so, dass die Bauart mit den Steinen zwar empfehlenswert sei, jedoch eine gewisse Undichtigkeit ergeben habe, die nur durch

¹⁵⁶ Der Inhalt dieses Kapitels wurde in stark verkürzter Form vorveröffentlicht in [Veihelmann, Holzer (Veröffentlichung voraussichtlich 2015)]; [Holzer, Veihelmann 2015].

¹⁵⁷ Vgl. hierzu [Güntzel 1986, ab S. 94], dort werden verschiedene Versuche ausführlich beschrieben. Insbesondere sind hier auch die Ausführungen von Steiner zu nennen, der in seiner Publikation im Jahre 1803 über die aus Pisésteinen gemauerten Gewölbe schreibt [Steiner 1803].

¹⁵⁸ Vgl. Kap. 5.1.3., die Beschreibung ist durchgehend im Konjunktiv verfasst.

DER MONOLITHISCHE BOGEN

mehrfache Beschichtung und damit bedeutenden Kosten abzustellen gewesen sei [Senff 1812, S. 20]. Aus diesem Grunde ließ er bei seinem zweiten Versuchsbau auch das Dachgewölbe vor Ort stampfen. Sein Resümee ist jedoch negativ: Er fasst diesen zweiten Versuch als „*ebenfalls ungünstig ausgefallen*“ zusammen. Eine Begründung für das Fehlschlagen lieferte Senff nicht, jedoch ist auch hier von mangelhafter Festigkeit auszugehen [Senff 1812, S. 19–20].

In Deutschland gingen die Versuche mit Lehm weiter.¹⁵⁹ Noch 1827 beschrieb Karl Marcell Heigelin wiederum Versuche zu monolithischen Gewölben. Zwar galt sein Hauptaugenmerk einem aus Lehm und Stroh erstellten Gewölbe, dessen Herstellung er ausführlich darstellte [Heigelin 1827, S. 88]. Aus der heutigen Sicht viel interessanter scheint jedoch das lediglich in einer Fußnote kurz angedeutete Probegewölbe aus Mörtelguss. Dazu sei aus gebrannten und zerhackten Lehmsteinen mit frisch gelöschtem Kalk, grobem Ziegelsand und Hammerschlag ein Mörtel hergestellt worden. Nach dem Untermischen von Gips sei die Mischung sofort auf die Schalung gestürzt und festgeschlagen worden. Das so hergestellte Gewölbe mit 19' Spannweite und einer Scheiteldicke von 4"¹⁶⁰ sei hinreichend fest gewesen, sich selbst zu tragen. Praktischen Nutzen sah Heigelin 1827 darin aber noch nicht: „*Natürlich war die Probe mehr ein Gegenstand der Curiosität, und nicht für ökonomische Construction bestimmt, denn ich fand die Ausführung zu kostspielig und zu mühselig, als daß sie zu irgend einem Gebrauch wohl empfohlen werden könnte.*“ [Heigelin 1827, S. 95–97].

Bereits ein Jahr später beschrieb Heigelin in seinem „*Lehrbuch der höheren Baukunst für Deutsche*“ wiederum einen Gewölbebau, den er nach italienischem Vorbild baute: „*Ein vorzüglicher, ziemlich grobkörniger Mörtel, gemengt mit Bimsstein-Stücken, wird über die Einschalung ausgebreitet, und bildet, nachdem er getroknet ist, eine Art von Gewölbe, das mit einer Ei-Schale verglichen werden könnte.*“ [Heigelin 1828, S. 68]. Auch hier bewertete er den praktischen Nutzen nach wie vor als gering, da ein solches Gewölbe weder belastet werden könne noch Feuersicherheit biete.

Die weiteren beschriebenen Versuche in Deutschland, monolithische Gewölbe zu bauen, sind gleichermaßen spärlich wie unbestimmt. Friedrich Engel beschrieb 1847 zwei Beispiele von Gewölben mit elf Fuß Spannweite aus Kalksandpisé. Um eine wirkliche Beurteilung der Bauweise scheint sich Engel jedoch zu drücken. Von den Versuchen lasse sich bis jetzt noch nichts Bestimmtes sagen, auch wenn die Beispiele den Anforderungen zu entsprechen scheinen [Engel 1847, S. 14]. Wenige Jahre später schreibt er in Zusammenhang mit eben jenen Gewölbeversuchen, ihm seien keine weiteren Versuche diesbezüglich bekannt geworden und der Kalksand sei wegen der großen Masse des Materials zur Ausbildung von Gewölben wohl auch nicht geeignet. Dennoch bedeute es einen großen Fortschritt, sollte es gelingen, Gewölbe aus Kalksand von entsprechender Dauerhaftigkeit und Billigkeit zu bauen [Engel 1851, S. 80–81]. Auch Johann Christian Wedeke beschreibt 1850 Versuche, Gewölbe mit Mörtel zu bauen, aber auch er macht keinerlei Aussage, ob er diese Bauweise als empfehlenswert einstuft oder nicht [Wedeke

¹⁵⁹ Vgl. insbesondere [Güntzel 1986], auf eine ausführlichere Betrachtung wird im Rahmen vorliegender Arbeit verzichtet.

¹⁶⁰ Heigelin arbeitete in Tübingen, 1 württemb. Fuß = 0,286 m, d. h. Spannweite 5,44 m, Scheitelstärke 11,4 cm.

1850, S. 20–21]. Ähnlich vage sind die Aussagen Friedrich Krauses: Bei den günstigen Resultaten, die durch die Anwendung des Kalksandes gemacht worden seien, erscheine „es von großer Wichtigkeit, auch Gewölbe aus dieser Masse zu construiren.“ [Krause 1851, S. 73].

Warum die Entwicklung in Deutschland dermaßen schleppend voranging, ist im Material begründet: Hier wurde größtenteils mit Luftkalk gearbeitet. Dieser hat zum einen eine dem hydraulischen Kalk untergeordnete Festigkeit, zum anderen ergibt sich das Problem, dass bei größeren Bauteilstärken das Innere nicht oder nur langsam erhärten kann [Kahlow 1999, S. 18]. Eine praktikable Ausbildung von Betongewölben konnte daher erst bei Verwendung hydraulischer Bindemittel – also natürlicher oder künstlicher hydraulischer Kalke bzw. später Portland-Zement – erfolgen. Diese waren hierzulande jedoch noch schwer zu beschaffen bzw. teuer. Johann Gottlieb Prochnow schrieb 1842 zur Verwendung hydraulischer Kalke: „Der hydraulische Kalk ist aber nicht blos zu theuer, sondern giebt nach dem Löschen auch zu wenig Ausbeute als daß man ihn mit Vortheil zu Gebäuden verwenden könnte.“ [Prochnow 1842, S. 7].

Dennoch ist Prochnow als einer der ersten Protagonisten der Betongewölbe in Deutschland zu bezeichnen.¹⁶¹ Bereits in der frühen Ausgabe seines Kalksandbuches beschreibt er den von Lebrun ausgeführten gewölbten Keller, auf den gleich noch einzugehen sein wird, und bemerkt, er werde einen solchen selbst bauen, wenn die Veranlassung gegeben sein werde [Prochnow 1842, S. 20]. In seiner 1848 erschienenen zweiten Auflage wird dies nochmals präzisiert: Wiederum beschreibt er den Bau eines Kellergewölbes, wobei nicht klar wird, ob er diesen selbst gebaut oder ob er dabei abermals auf die Publikationen Lebruns zurückgegriffen hat. Dennoch positioniert er sich deutlich; im Zusammenhang mit der Beschreibung des Gewölbes führt er auch an, dass man für Fundamente und Keller nur hydraulische Bindemittel verwenden dürfe [Prochnow 1848, S. 24]. Auch wenn man vermuten kann, dass zu dieser Zeit im deutschsprachigen Raum Betongewölbe bereits vereinzelt ausgeführt wurden, „erfunden“ wurden sie nicht hierzulande: Deutsche Baumeister konnten auf eine lange Tradition des Bauens mit Beton – auch außerhalb des Wasserbaus – zurückgreifen.

Es gibt mittelalterliche Gewölbe in dieser Bauart, und auch in der Renaissance wurde die Technik manchmal angewendet [Holzer, Veihelmann 2015]. Bevor man jedoch hydraulischen Kalk künstlich herstellen konnte, beschränkte sich das Bauen derartiger Gewölbe auf Gebiete, die über ein Vorkommen an natürlichen hydraulischen Bindemitteln verfügten. Das Wölben mit Beton blieb daher bis zum Ende des 18. Jahrhunderts eine lokale Technik, die sich beispielsweise auf die Puzzolan-Gebiete Italiens wie der Stadt Rom und der Gegend um Neapel beschränkte. So berichtet etwa der französische Wissenschaftler Abbé Nollet: „Starker Kalk mit Puzzolanen gemischt ergibt einen wesentlich zuverlässigeren Mörtel als den unseren: das kühnste Beispiel, von dem ich berichten kann, ist die Art, wie man Gewölbe in Rom baut. Man hat dazu mit Brettern, die mit Holzsprießen unterstützt waren, eine leicht gewölbte Fläche hergestellt. Auf dieses Gerüst hat man ein

¹⁶¹ Vgl. die Aussage in einem Artikel von 1861, wengleich die dortige Begriffsdefinition nicht klarstellt, ob Prochnow wirklich hydraulischen Kalk verwendete: „In der Altmark in Preußen sind viele Domainen in Béton erbaut, woselbst sich Herr Prochnow um die Einführung dieser Methode sehr verdient gemacht hat.“ [Großmann 1861, S. 51].

*Gewölbe von sieben bis acht Zoll Dicke gemauert, und zwar mit dem soeben beschriebenen Mörtel mit untergemischten Bruchsteinen und ohne Rücksicht auf deren Ordnung. Fünf oder sechs Tage später entfernte man den Unterbau und das Gewölbe war fest.*¹⁶² [Nollet 1753, S. 479]. Diese Bauweise entspricht im Wesentlichen bereits dem heutigen Verständnis von Beton als einer mit hydraulischem Bindemittel fertig gemischten Masse, deren Bestandteile regellos und ohne Verband auf eine Schalung gebracht wurden.

Ähnlich zu werten sind die Arbeiten für eine gegenüber der Innenstadt von Lyon errichtete neue Vorstadt „*le Brotaux*“ [Rozier 1782, S. 246]. Die dortigen Gebäude entstanden in den 1770er Jahren auf dem anderen Ufer der Rhone in der feuchten Flussniederung, weshalb die Keller in wasserdichter, aber dennoch möglichst kostengünstiger Bauweise zu erstellen waren. François Rozier beschreibt in seinem mehrbändigen Werk „*Cours complet d'agriculture théorique*“ unter dem Stichwort „*caves*“ die dort zur Ausführung gekommene Bauweise unter der Überschrift: „*Eine kostengünstige Art, Kellergewölbe ohne Werksteine oder Ziegel sowie ohne Lehrgerüste zu bauen, und damit zwei Drittel weniger Kosten als bei Steingewölben zu verursachen.*“¹⁶³ [Rozier 1782, S. 608–609]. Dazu müsse man für die Fundamente Gräben ausheben. Mit dieser ausgehobenen Erde forme man sodann den Lehrbogen. Um eine gleichmäßige Form zu erhalten, könne man an beiden Seiten sowie in der Mitte Schablonen einbringen, mit denen man eine Lehre für die Erdschalung¹⁶⁴ habe. Die Erde werde dann festgeschlagen, die Schablonen verbleiben in der Erde. Sie dienen auch dazu, die Form wiederherzustellen, sollte diese durch starken Regen niedergedrückt werden. Das Material für die Konstruktion sei „*Béton*“ [Rozier 1782, S. 609], den man aus Kalk, Sand und Kies herstelle. Man baue dann im ersten Jahr die Wände und bedecke sie mit Erde. Im zweiten Jahr grabe man diese wieder aus und betoniere das Gewölbe. Nach dem zweiten Jahr könne man sich dann sicher sein, dass der Beton die notwendige Beschaffenheit habe, dass er eine einzige Masse bilde. Dann könne man die Erde unter dem Gewölbe entfernen [Rozier 1782, S. 609].

Diese Betonkeller, so Rozier, seien nach Fertigstellung absolut wasserdicht [Rozier 1782, S. 608–609]. Ein solcher Beton erhärte auch unter Wasser und verzeichne dabei im Laufe der Zeit sogar noch Festigkeitsgewinne [Rozier 1782, S. 245], was ein eindeutiger Hinweis auf die Verwendung von natürlichem hydraulischen Kalk als Bindemittel ist. Zu Roziers Zeit experimentierte man in Frankreich auch andernorts mit der Herstellung hydraulischer Mörtel, vgl. hierzu beispielsweise die Untersuchungen von Lorient [Lorient 1774] und La Faye [La Faye 1777]. Da diese die erst posthum publizierten naturwissenschaftlichen Grundlagen zum hydraulischen Kalk, die John Smeaton¹⁶⁵ erforscht hatte [Smeaton 1791], noch nicht kannten, glaubten diese Techniker noch, die

¹⁶² Original: „La pozzolane mêlée avec de la chaux forte, fait un mortier sur lequel on se fie beaucoup plus que nous n'oserions faire sur le nôtre: l'exemple le plus hardi que j'aie à citer, c'est la façon dont j'ai vû construire des voûtes à Rome. On forma avec des planches soutenues par des piliers de bois, un plancher un peu bombé: on maçonna sur cette espèce d'échaffaud une voûte de sept à huit pouces d'épaisseur, avec le mortier dont je viens de parler, & des moëllons que l'on mit pêle-mêle, sans avoir aucun égard à leur figure: cinq ou six jours après, on ôta le bâti de planches qui étoit dessous, & la voûte se trouva solide.“

¹⁶³ Original: „Manière économique de construire les voûtes de caves sans pierres, briques, ni ceintre en charpente, & qui coûtent les deux tiers moins que celles en pierres.“

¹⁶⁴ Vgl. Kap. 5.1.3.

¹⁶⁵ Die illustrierte, französische Übersetzung des Smeatonschen Werkes wurde sogar erst 1810 veröffentlicht.

Hydraulizität des Kalkes basiere lediglich auf besonderen Lösstechniken. Rozier hebt allerdings hervor, dass der hydraulische Mörtel von Lyon mit den Erfindungen von Lorient und La Faye auf keinen Fall verwechselt werden dürfe [Rozier 1782, S. 245].

Ebenso zu den frühen Aussagen zu Betongewölben ist die von Jean-Baptiste Rondelet zu zählen. In der Erstausgabe seines *„Traité théorique et pratique de l'art de bâtir“* von 1802 stellte er fest, dass es in der Nähe von Metz eine äußerst feste Gesteinsart gebe, mit der man einen hochqualitativen Kalk herstellen könne. *„Dieser Kalk, gelöscht und mit Kies gemischt, ergibt einen Beton bzw. eine Mörtelart, deren Zusammenhalt so groß ist, dass man damit Gewölbe bauen kann, ohne Ziegel oder Bruchsteine zu verwenden. Diese Gewölbe bilden dann nur ein einziges Stück, das so fest ist wie der Stein selbst.“*¹⁶⁶ [Rondelet 1802, Bd. 1, S. 249]. Um sich eine Vorstellung von der Qualität dieses Kalks zu machen, berichtet Rondelet, dass Arbeiter, die nicht um die Materialeigenschaften wussten, diesen Kalk einsumpften und nach einem Jahr bemerkten, dass er dermaßen fest war, dass man Keile und Vorschlaghammer benötigte, um ihn zu brechen, um ihn wenigstens noch als Bruchstein verwenden zu können [Rondelet 1802, Bd. 1, S. 249].¹⁶⁷ Auch hier ist die Verwendung eines hydraulischen Kalkes damit nachgewiesen.

Im Jahre 1823 beschrieb Joseph Antoine Borgnis die Ausführung von Gewölben aus Beton. Diese seien äußerst einfach zu bauen, es reiche aus, den Beton auf die Schalung des Lehrgerüsts zu geben. *„Diesen Beton muss man verdichten sowie in gewissen Abständen Ziegel- oder Werksteinrippen einbauen.“* [Borgnis 1823, S. 190]. Wenn man diese kostengünstige, einfache und so zeitsparende Technik mit dem in Paris gebräuchlichen Werksteinbau vergleiche, so könne man sich nur wundern, dass verdiente Architekten den Werksteinbau trotz seiner offensichtlichen Mängel annehmen [Borgnis 1823, S. 190].¹⁶⁸ Die Nachteile sah er wie folgt: *„Tatsächlich ist der Steinschnitt der Keilsteine ebenso aufwendig wie mühsam; das Bewegen dieser schweren Werkstücke erfordert Maschinen und umfangreiche Lehrgerüste. Gewerbsmäßig greift man auf fähige und geübte Arbeiter zurück, um sie bei dergleichen Arbeiten einzusetzen und die Schwierigkeiten zu überwinden, die sich üblicherweise einstellen. (...) Außerdem nehmen die Werksteine im Laufe der Zeit unterschiedliche und unharmonische Farbtöne an, was eine unangenehme Wirkung hervorruft. Als weitere Nachteile beachte man das hohe Gewicht, das einen hohen Bogenschub zur Folge hat und außerdem sehr starke Widerlager notwendig macht, sowie den Umstand, dass die Keilsteine mit ihren schwachen Mörtelfugen keinen vergleichbaren*

¹⁶⁶ Original: „Cette chaux nouvellement éteinte et mêlée avec du gravier, produit un betton, ou espèce de mortier, don't la consistance est si grande, qu'on peut en construire des voûtes sans briques ni moilons; ces voûtes ne forment, dans la suite, qu'une seule pièce aussi dure que la pierre.“

¹⁶⁷ Original: „Pour donner une idée de la bonté de cette chaux, on rapporte que des ouvriers qui qu'en connaissaient pas la qualité, s'avisèrent d'en éteindre dans un bassin qu'ils couvrirent de sable pour la conserver. Au bout d'un an elle se trouva si dure, qu'il fallut, pour la rompre, des coins et des masses de fer, afin de l'employer comme moilon.“

¹⁶⁸ Original: „Les voûtes en béton s'exécutent avec une facilité extrême, quelle que soient leur forme et leurs dimensions. Il suffit de déposer le béton sur le cintre, couvert de planches, qui sert de moule à la voûte; de massiver ce béton, et de former, de distance en distance, des chaînes en briques ou en pierres. (...) Si l'on compare cette méthode si peu coûteuse, si facile si expéditive, avec celle des voûtes en pierres de taille usitée à Paris, l'on est étonné que des architectes de mérite, qui ont étudié les monuments antiques, aient pu l'adopter, malgré ses imperfections évidentes.“

DER MONOLITHISCHE BOGEN

*Zusammenhang erreichen wie Gewölbe, die aus kleinen Materialien bestehen, die von gutem Zement umhüllt sind.*¹⁶⁹ [Borgnis 1842, S. 283–284].

Zum Ende der 1820er Jahre begannen in Frankreich die Gebrüder François-Martin und Jean-Auguste Lebrun mit ersten Bauten aus Beton. 1829–1830 baute Jean-Auguste sein Wohnhaus [N. N. 1865a, S. 411],¹⁷⁰ dessen Decken als Betongewölbe mit bis zu 6,20 m Spannweite ausgeführt wurden. Der Beton bestand aus einem Teil gelöschtem Kalk, zwei Teilen reinem Sand und zwei Teilen Kiesgeröll von 8–12 cm Größe.¹⁷¹ Drei Monate nach der Ausrüstung der Decken erfolgte eine Probelastung des unteren Stockwerkes. Auf der gesamten Fläche wurde eine 3 m hohe Schicht Erde aufgebracht, *„ohne daß diese große Last irgend eine Veränderung hervorgebracht hätte.*¹⁷² [Gourlier 1832a, S. 118].

Bereits in der Frühzeit der monolithischen Gewölbe sah man einen großen Vorteil der Bauweise gegenüber den Ziegel- oder Natursteingewölben im vermeintlich fehlenden Horizontalschub, da dadurch die Umfassungswände dünner ausgeführt werden konnten. Die bereits angesprochenen Pioniere des monolithischen Gewölbebaus sprachen sich hierzu wie folgt aus: Heigelin meinte 1828, der *„Mörtel-Verband ist wesentlich, um den Seitendruck zu vermindern.*“ [Heigelin 1828, S. 67]. Auch Lebrun vertrat diese Meinung: *„Da der Steinmörtel die Eigenschaft hat, daß er nicht zusammendrückbar ist, und nach seiner vollständigen Festigkeit nur eine Masse zu bilden, so sieht man leicht ein, daß Gewölbe, welche aus diesem Stoffe erbaut wurden, vom Drucke befreit sind, und daß alsdann die Mauern nur diejenige Dicke zu haben brauchen, welche man denen giebt, welche Decken und gewöhnliche Bedachungen tragen.*“ [Lebrun 1837, S. 93–94]. Noch deutlicher formulierte es Prochnow, dessen größere Sorge dem zu großen Eigengewicht als dem Horizontalschub galt: *„und das ganze Gewölbe stellt sich wie ein einziger Steinblock dar. Dieser Steinblock drückt nun nicht seitwärts gegen die Seitenmauern (Widerlagen), wie ein Bogen von Ziegeln, sondern niederwärts, wie jeder Stein aus dem Ganzen. Wenn man daher auch den Bogen*

¹⁶⁹ Original im Zusammenhang: „Le volte in calcetruzzo sono eseguibili con molta facilità qualunque ne siano le forme e le dimensioni; basta deporlo sulla centinatura la quale è coperta di tavole che segnano la precisa conformazione dell'intradosso, poi batterlo ben bene, e formare di distanza in distanza degli archi di concatenazione con buoni mattoni. Gli incavi de' cassettoni sogliono essere determinati da rilievi di tavole poste sul coperto della centinatura. Così facendo gli antichi sollevano ornare le volte magnificamente senza ledere l'economia come osservasi nel Panteon di Roma, nel tempio della Pace, in quello di Venere a Roma, e nella chiesa antica di S. Bernardo, che era uno di calidarii delle terme diocleziane. Se si paragona questo metodo così semplice e di poca spesa, con quello d'impiegare in pietra viva per le volte interne in uso specialmente in Francia, fa stupire come quest'ultimo sia stato prescelto da non pochi valenti architetti malgrado i suoi evidenti difetti. Infatti il taglio esatto de' cunei è non meno lungo che malagevole; il movimento di queste pesanti masse richiede macchine ed armature voluminose; è mestiere ricorrere a lavoratori abili e bene esercitati per porli in opera superando le molte difficoltà che soglionsi presentare. I cassettoni poi ed i comparti, dovendo essere scolpiti sul luogo, sono costosissimi e non presentano quelle ben pronunciate cavità che danno grande maestà agli antichi comparti. D'altra parte le pietre vive acquistano col tempo delle tinte varie e disarmoniche che producono un effetto spiacevole. Si aggiunga poi a tali inconvenienti quello del loro eccessivo peso, che rende la spinta maggiore e richiede piedritti d'altrettanto più voluminosi, che i cunei congiunti con deboli strati di cementi non acquistano mai fra di loro aderenza paragonabile a quella che lega le volte formate di minuti materiali avviluppate da buon cemento.“

¹⁷⁰ Vgl. Kap. 3.2.3.

¹⁷¹ Ausführliche Beschreibung in [Gourlier 1832b, S. 99–103, deutsche Übersetzung: Gourlier 1832a, S. 114–119].

¹⁷² Original im Zusammenhang: „Afin d'éprouver la solidité de l'une des voûtes de l'étage inférieur, trois mois après son décintrement, elle a été recouverte, dans toute son étendue, d'une couche de terre de 3 mètres de hauteur, sans éprouver la moindre altération.“ [Gourlier 1832b, S. 102].

nicht allzuflach machen darf, ist es doch auch nicht rathsam, demselben einen zu großen Zirkel zu geben, weil er sonst zu schwer werden und deshalb zu sehr niederwärts drücken würde.“ [Prochnow 1848, S. 23].¹⁷³ Diese Ansicht hielt sich bis zum Ende des 19. Jahrhunderts.¹⁷⁴ Erst die größer werdende Erfahrung diesbezüglich verbesserte auch das Verständnis für die Bauweise.¹⁷⁵

Das erste große, öffentliche Projekt der Brüder Lebrun, das bekannt ist, ist der Bau des Rathauses von Gaillac aus dem Jahr 1833¹⁷⁶ (Abbildung 4.3). Während ursprünglich die Keller konventionell in Mauerwerk gebaut werden sollten,¹⁷⁷ schreibt Lebrun nach der

¹⁷³ Vgl. auch „Das Gewölbe erhält sich trotz seines bedeutenden Gewichts und seiner Spannweite von 8m0 ohne Nachtheil zwischen den Mauern, (...) was seinen Grund nach Coignets Versicherung darin hat, daß das Gewölbe wie ein Monolith [sic] zu betrachten ist, welcher keinen Schub auf die Mauern ausübt.“ [N. N. 1863, S. 239].

¹⁷⁴ Vgl. Zitat von 1879: „Von vorn herein ist es mir undenkbar, dass ein aus einzelnen regelrecht verlegten Steinen bestehender Bogen nach derselben Theorie behandelt werden könne, wie ein fugenloser, aus einer homogenen Masse bestehender Konkret-Bogen. Der Vergleich eines Konkret-Bogens mit einem Balken scheint mir dagegen sehr nahe zu liegen (...). Weitere Belege für die Richtigkeit dieser Anschauung sind in der Thatsache enthalten, dass ein Konkret-Gewölbe entweder gar keinen oder doch nur einen äusserst geringen Seitendruck auf die Widerlager ausüben kann.“ [Schmölcke 1879, S. 528]. Oder eine Zusammenstellung solcher Zitate in einem Artikel „Sind Gewölbe möglich ohne Seitenschub auf die Widerlager?“ aus dem Jahre 1887: „Vielfach liest und hört man heutzutage die Ansicht ausgesprochen, dass Gewölbe aus Beton oder Gewölbe aus Bruchstein- oder Ziegel-Mauerwerk, welche mit Mörtel von grosser Bindekraft hergestellt sind, keinen Seitenschub auf ihre Widerlager äusserten, vielmehr bei lotrechter Belastung ihre Widerlager in lotrechtem Sinne beanspruchten. Nicht nur in Fachzeitschriften wird ab und zu diese Behauptung vertreten, auch namhafte Lehrbücher der Hochbaukonstruktionen haben solche und ähnliche Anschauungen zum Ausdruck gebracht. So schreibt der Verfasser eines der neuesten Werke über Hochbaukonstruktionslehre wie folgt: ‚Die bedeutende Bindekraft des hydraulischen Mörtels hebt den Charakter des Gewölbes vollkommen auf und sind infolge dessen Steindecken in Cementmörtel als vollständig monolithische Massen zu denken, die durch ihre Kohäsion die auf sie übertragenen zerstörenden Einwirkungen, namentlich den in allen Gewölben thätigen Horizontalschub vernichten.‘ Ein anderer Autor äussert sich in folgender Weise: ‚Flache Kappengewölbe bilden samt Hinterfüllung nach erfolgter Erhärtung eine einzige fest zusammenhängende Masse oder unterhalb bogenförmige Platte ohne Seitenschub, was immer enragierte Gewölbetheoretiker dagegen sagen mögen... ‘ ‚Trotz vielfach entgegenstehenden Ansichten sind wir der Überzeugung, dass flache Betongewölbe nur so lange als Gewölbe anzusehen sind, als die Masse noch frisch und nicht voll erhärtet ist. Nach vollständig eingetretener Bindung und Erhärtung bildet Gewölbe und Wand ein Stück, der Bogen wird Platte und übt keinen Seitenschub mehr aus oder nur einen solchen, welcher der der Masse zukommenden, sehr geringen Elastizität entspricht. Die Masse trägt sich vermöge der inneren Festigkeit, wird nur auf Bruch (?) in Anspruch genommen und übt nur senkrechten Druck gerade so, wie ein ausgehohlter Stein oder ein krumm gewachsener oder geschnittener Stamm sich ohne Widerlager innerhalb gewisser Weiten und Belastungen in sich selbst frei stützen und tragen kann.“ [Wittmann 1887, S. 97].

¹⁷⁵ Vgl. die Aussage von Bernhard Liebold im Jahre 1880: „Die Betongewölbe werden wegen ihres besonderen Verhaltens zwischen Bétonmauern oftens [sic] auch als plattenartige Decken oder gebogene Platten betrachtet, die keinen Schub, sondern nur einen senkrechten Druck auf die Gewölbemauern ausüben sollen. Diese Auffassung ist jedoch unrichtig, denn die Bétongewölbe werden, wenn sie zwischen unwandelbar festen Widerlagern eingespannt sind, rückwirkend in Anspruch genommen und nur bei Widerlagern von ungenügender Stärke relativ, wie andere unter den gleichen Umständen.“ [Liebold 1880, S. 55]. Vgl. auch: „Zum mindesten wird niemand in Abrede stellen, dass Wendungen wie: ‚Das Gewölbe wirkt als monolithische Masse und zerstört durch Kohäsion den Horizontalschub,‘ oder ‚Die Masse trägt sich vermöge der inneren Festigkeit‘ einen richtigen Begriff von den in solchen Konstruktionen wirkenden Kräften nicht liefern, sondern lediglich als formale Umschreibungen von dem Inhalt nach unbekanntem Vorgängen zu betrachten sind. (...) Die Unmöglichkeit, dass eine Konstruktion wie die eben betrachtete als Balkenträger funktionierte, bedarf keiner weiteren Auseinandersetzung, da Zugspannungen vollkommen ausgeschlossen sind und die Auflagerreaktionen trotz lotrechter Belastung eine geneigte Lage haben.“ [Wittmann 1887, S. 97].

¹⁷⁶ Die gesamten Bauarbeiten dauerten von 1833–1837 [Gourlier et al. 1847, S. 36], eine genaue Datierung des Kellers ist nicht vorhanden. Das Gewölbe ist bis heute erhalten, vgl. hierzu auch Kap. 5.1.3.

¹⁷⁷ In einer im Archiv der Stadt Gaillac überlieferten Baubeschreibung von 1832, unterschrieben vom verantwortlichen Architekten François-Martin Lebrun, ist lediglich von den verschiedenen Arten von Mauerwerk und Mörtel die Rede, Beton wird nicht erwähnt [AMdG, Sign. unbekannt].

Ausführung, die Stadtverwaltung habe seinen Vorschlag, Beton zu verwenden, sehr gerne angenommen [Lebrun, Crelle 1843, S. 303]. Daraufhin seien sämtliche Fundamente und das Kellergewölbe aus Beton hergestellt worden [Gourlier et al. 1847, S. 36].¹⁷⁸ Dazu griff er genau auf die weiter oben bereits erläuterte Technik von Rozier zurück, das Gewölbe mit Beton auf einer Erdschalung zu erstellen.¹⁷⁹ Dieser Keller hat bei einer Länge von 18 m eine Spannweite von 6 m mit einem Stich von 1 m. Der Beton wurde mit einer Zusammensetzung von 1 Teil gelöschtem hochhydraulischem Kalk, 1 Teil Sand und 2 Teilen Kies mit einer maximalen Größe der Körner „wie Walnüsse“ ausgeführt [Lebrun 1835, S. 87–88]. Eine Vor-Ort-Untersuchung¹⁸⁰ dieses Kellers zeigte jedoch eine außergewöhnlich grobe Zusammensetzung mit an der Oberfläche sichtbaren Zuschlägen von bis zu 20 cm Durchmesser (Abbildung 4.4). Eine weitere Auffälligkeit des Gewölbes sind vertikale Ziegelrippen wie sie Joseph Antoine Borgnis bereits empfahl, durch die das Tonnengewölbe in mehrere einzelne Abschnitte geteilt wird (Abbildung 4.5). Lebrun schrieb hierzu: *„In den Gewölben großer Dimensionen wäre es ratsam, einige horizontale und vertikale Ketten aus Ziegel oder aus Stein einzubauen, jedoch nur am Intrados mit 40 bis 50 cm Stärke: sie hätten zum Ziel, die Einheit des massiven Körpers bis zur Oberseite zu unterbrechen und das Auftreten von Schwinden im Mauerwerk zu reduzieren.“*¹⁸¹ [Lebrun 1843, S. 133].

Lebrun schalte sein Kellergewölbe – anders als Rozier – bereits nach vier Monaten aus, dennoch: Er griff auf eine etablierte Bautechnik zurück. Lebrun kannte Roziers Buch, denn er zitiert es, wenn auch nicht im Kontext des Kellergewölbes auf Erdschalung [Lebrun 1835, S. 143]. Die Herkunft der Bauweise ist also eindeutig. In Deutschland wurden im 19. Jahrhundert jedoch insbesondere die Schriften von Lebrun wahrgenommen, einige beziehen sich gar direkt auf ihn.¹⁸² Ein Grund hierfür mag sein, dass es zu den beiden Beton-Monographien Lebruns [Lebrun 1835 und Lebrun 1843] deutsche Übersetzungen gab [Lebrun 1837 und Lebrun 1844]. Bis heute nennt die Forschung hierzulande in Verbindung mit frühem Betonhochbau eher Lebruns Namen als die zuvor genannten.¹⁸³

Neben den Gebrüdern Lebrun ist als weiterer Betonbaupionier sicherlich François Coignet zu nennen. Dieser hatte 1853 in seinem Wohnhaus noch Balkendecken mit Betonplatten eingebaut, ein 1857 in St. Denis bei Paris gebautes Haus wies schon durchgehend gewölbte Decken auf. Die Fundamente, die Kellergewölbe sowie sämtliche Wände, alles sei ohne Ausnahme aus „*béton pisé*“ [Coignet 1855a, S. 7]. Die Bauweise wurde bauzeitlich so kommentiert: *„Nach dieser neuen Art würde ein Haus nicht mehr Umstände erfordern als ein Biskuitkuchen, und es gäbe wirklich keinen großen Unterschied zwischen den Abläufen von*

¹⁷⁸ Original: „La totalité des fondations de cet édifice a été exécutée en béton, ainsi que les voûtes de caves.“

¹⁷⁹ Vgl. [Lebrun 1835, S. 86–97] und [Lebrun 1843, S. 168–170].

¹⁸⁰ Durch die Verfasserin im Herbst 2013 durchgeführt. Dieser Keller ist normalerweise nicht zugänglich und nur durch eine kleine Öffnung mittels einer Leiter zu erreichen. Diese Untersuchung war nur durch die freundliche Unterstützung der Stadt Gaillac umsetzbar.

¹⁸¹ Original: „Dans les voûtes de grande dimension, il serait opportun de placer quelques chaînes horizontales et verticales en briques ou en pierre, à l'intrados seulement, sur 40 à 50 cm d'épaisseur: elles auraient pour but de rompre l'unité du massif au parement, et d'atténuer l'apparence du retrait de la maçonnerie.“

¹⁸² Vgl. Fußnote 87.

¹⁸³ Vgl. beispielsweise [Kahlow 1999, S. 17]; [Stiglat 1999b, S. 59]; [Stiglat 2004]; [Stiglat 2012], usw.

*Konditoren und Maurern, da ja auch hier Häuser in eine Form geworfen werden.*¹⁸⁴ [Ferré 1858, S. 68].

In England, wo die Erforschung und Herstellung hydraulischer Kalke bzw. Romanzemente richtungsweisend war, wurde der Beton im Gegensatz zu Frankreich in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts kaum zu tragenden Bauteilen verwendet. Vorrangig wurde Zement hier jedoch für Mauer- und Putzmörtel verwendet. So sind in der hierzu maßgeblichen englischen Monographie von Charles William Pasley [Pasley 1838, S. 16–26],¹⁸⁵ nur wenige Beispiele zeitgenössischer englischer Betonbauten aufgelistet. Im Hochbau nennt er sogar nur einen einzigen, nämlich das aus hydraulischem, extrem schnell abbindendem Dorking-Kalk hergestellte Versuchsgewölbe, das im Jahre 1835 der Oberstleutnant George Judd Harding im Marinestützpunkt Woolwich bei London ausführte (Abbildung 4.6). Das Bauwerk hatte eine Spannweite von etwa 5 m, die Bogenstärke betrug etwa 1,2 m. Der Beton wurde von Hand gut gemischt und sofort danach mit Schaufeln auf die Schalung gegeben, wo zwei Arbeiter das Material mit Stampfern verdichteten, und zwar in Form von Keilsteinen [Harding 1837, S. 36]. Bereits vier Tage nach Gewölbeschluss wurde es ausgerüstet [Harding 1837, S. 33] und zwei Monate später einem Beschusstest unterworfen [Harding 1837, S. 38–41]. Obwohl das mangelhaft fundierte Gewölbe infolge von großen Setzungen auf der ganzen Länge im Scheitel aufriss [Harding 1837, S. 33], verliefen die Beschussversuche erfolgreich [Harding 1837, S. 35–41]. Sämtliche Schäden wurden dokumentiert. Harding resümierte abschließend, dass sich das Bauwerk trotz aller Beschädigungen, die es durch den Beschuss erlitten habe, noch in einem solchen sicheren Zustand befinde, dass es als Munitionslager im Ernstfall empfehlenswert sei [Harding 1837, S. 40]. Da die Kosten bei Betongewölben nur die Hälfte derer bei Backsteinbauten seien, könne er die Verwendung von Beton für solche Bauaufgaben sowohl technisch als auch wirtschaftlich empfehlen [Harding 1837, S. 34].¹⁸⁶

In Deutschland begann ein praktikabler Umgang mit monolithischen Gewölben erst mit der zunehmenden Verfügbarkeit hydraulischer Kalke bzw. des Portland-Zements in den 1850er Jahren. Wie die Gebrüder Lebrun oder François Coignet sammelte auch der deutsche Betonbaupionier E. H. Hoffmann seine ersten Erfahrungen bei der Herstellung seines eigenen Wohnhauses. So baute er 1855 in seinem zweistöckigen Gebäude unter anderem böhmische Kappen aus Stampfbeton ein [Hoffmann 1858, S. 453]. Dabei unternahm er auch verschiedenste Versuche zu Mischungsverhältnissen. Was aber viel interessanter erscheint, ist, dass er dem Misstrauen gegenüber dem Beton bezüglich Schwindens in der Weise begegnete, dass er in seinem eigenen Haus Gewölbe baute, die ohne spezielle Auflager stumpf gegen die Außenwände stießen. Die Tatsache, dass diese

¹⁸⁴ Original: „D’après ce mode nouveau, une maison ne demanderait pas plus de façon qu’un gâteau de Savoie, et il n’y aurait vraiment pas une grande différence entre les procédés du pâtissier et ceux du maçon, puisqu’il s’agirait de jeter les maisons dans un moule.“

¹⁸⁵ Es ist jedoch davon auszugehen, dass die englischen Baumeister sich von den französischen Arbeiten leiten ließen. So bezieht sich Pasley in seiner Arbeit u. a. auf Treussart [Pasley 1838, S. 98]. Dieser wiederum schrieb bereits 1829 von bombensicheren Betongewölben: „Nous avons souvent à construire des bâtiments voûtés à l’épreuve de la bombe pour les magasins à poudre, casernes et autres établissements. Dans les pays où les mortiers sont de mauvaise qualité, je ne doute pas qu’il soit plus avantageux de les faire en béton.“ [Treussart 1829, S. 226].

¹⁸⁶ Original: „I feel therefore able to recommend its adoption in the construction of arches, both as to strength and economy.“

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Gewölbe nicht einstürzten, war für ihn der Beweis dafür, dass Beton nicht schwindet [Hoffmann 1858, S. 453].

Auch Johann von Mihálik schlägt in seiner Monographie vor, ganze Häuser aus Beton zu bauen [Mihálik 1858, S. 163–171]. Seine Beschreibung und Abbildungen des Baus von Betonhäusern sind sichtlich an Lebruns Buch von 1843 angelehnt und daraus weiterentwickelt (Abbildung 4.7 und Abbildung 3.9). An eigenen Erfahrungen aus dem Hausbau erwähnt Mihálik nur einen von ihm 1855 in einer teilweise wassergefüllten Baugrube errichteten kleinen Keller [Mihálik 1858, S. 172]. Als einen Vorteil sieht er die Ausbildung des Daches als Gewölbe, man könne diese entsprechend der Spannweite dünn ausführen: *„Es versteht sich von selbst, dass ein solches Gewölbe mit Nichts zu überdecken kommt, da es dicht wird und jedwedem Witterungswechsel Trotz bietet.“* [Mihálik 1858, S. 169]. Der Regen trage insbesondere wenn er lange anhalte sogar zur Verbesserung des Betondaches bei [Mihálik 1858, S. 169]. Mihálik hatte mit seiner Monographie sicherlich einen bedeutenden Anteil daran, dass in der Folge vermehrt mit Beton gebaut wurde.

Die in Kap. 3.2.3 bereits besprochenen Gebäude,¹⁸⁷ sowohl das Häuschen des Schleusenwärters an der Isar sowie die verschiedenen Ausführungen im Auftrag der königlichen Eisenbahnverwaltung beim Bau der oberschwäbischen Bahnen, erhielten auch gewölbte Bauteile. So ist das Dach des Münchner Bauwerks durch ein spitzbogiges Betongewölbe ersetzt, das an der schwächsten Stelle nur 14,6 cm stark ist [Großmann 1861, S. 54] und auch die Schlierholzchen Bauwerke verfügten über gewölbte Decken und Dächer. Die Ausführung der Häuschen mit Betondach bewährte sich übrigens nicht: Im Jahr 1881 wurde berichtet, dass bei den Betondächern Undichtigkeiten aufgrund feiner Risse im Gewölbe entstanden seien. Mehrere dieser Gebäude seien bereits nachträglich mit Sparrendächern versehen worden. Als Ursache für die Risse wurden die Erschütterungen durch die Eisenbahn benannt. Für sonstige Bauteile sei der Beton jedoch gut geeignet [Schwering, Schlierholz 1881, S. 548].

Noch im Jahr 1872 war das Misstrauen gegen die Betongewölbe in Deutschland nicht ausgeräumt. Hoffmann erwies sich hier wiederum als einer der Hauptverfechter des neuen Materials: *„Ich würde auf diese Angelegenheit nicht zurückkommen, fände nicht m. E. ein in der bisher noch nicht genügend bekannten Sache an und für sich ungerechtfertigtes Misstrauen gegen diese Baukonstruktion statt, welches deren Ausführung zum Theil sehr erschwert, zum Theil von ihrer Anwendung ganz abhält, während sie häufig genug vor Ziegelgewölben den Vorzug verdienen möchte.“* [Hoffmann 1872b, S. 384]. Nochmalig bezieht er sich auf die zuvor beschriebenen Gewölbe in seinem Wohnhaus und versucht deren Eignung zu begründen. Ein aus Steinen und Mörtel zusammengesetztes Gewölbe biete seiner Ansicht nach zu viele Stellen für ungenaue Ausführung, *„diese Gefahr hört auf, wenn das Gewölbe aus einem einzigen Körper gebildet wird.“* [Hoffmann 1872b, S. 384]. Ein vollkommenes Gewölbe bedinge ein gleichartiges Material in allen seinen Teilen. Da Stein und Mörtel aber verschiedene Festigkeiten haben und die größere Festigkeit nicht oder nur zum Teil einen Beitrag zur Gesamtfestigkeit liefere, bevorzuge er den Gussmörtel, da hierbei die Bedingungen, *„dass das Gewölbe aus einem einzigen Stein besteht, als dass derselbe gleichartige Festigkeit hat, in annähernder Vollkommenheit ein[treten],* Erg. d.

¹⁸⁷ Vgl. auch die dort genannten Abbildungen.

Verf.]“ [Hoffmann 1872b, S. 384]. Da Richtung und Lage von Fugen gleichgültig seien, werden die Arbeiten vereinfacht und teure Maurer können durch ungelernete Arbeiter ersetzt werden. Die 1855 ausgeführten Gewölbe „*bestätigen bis heute, dass ein Schwinden des Materials nicht eintritt.*“ [Hoffmann 1872b, S. 384]. Mit Messungen an ausgeführten Gewölben wies er nach, dass sich Ziegelgewölbe hingegen um mehr als das zehnfache setzten als gleichartige Gewölbe aus Grobmörtel [Hoffmann 1872b, S. 384].

Der Aufschwung des Bauens mit Beton im Hochbau im größeren Stile erfolgte dann ab den 1870er Jahren, z. B. mit der Siedlung Viktoriastadt in Rummelsburg bei Berlin und mit der Arbeiterkolonie der Firma Liebold in Vorwohle.¹⁸⁸ Auch wenn beide Projekte immer wieder als äußerst frühe Betonbauten bewertet werden, so konnte auch hier – wie ausführlich begründet wurde – auf langjährige Erfahrungen auch im deutschsprachigen Raum zurückgegriffen werden. Zum Ausgang des 19. Jahrhunderts waren es verschiedene Triebfedern, die die Anwendung des Betons auf eine breitere Basis stellten. Die Analyse dazu erfolgt in Kap. 4.5.

4.2 Erste Beispiele von Bogenbrücken aus Beton in Frankreich

Im Jahr 1823 schlug der französische Inspecteur Général des Ponts et Chaussées Louis Bruyère vor, dass gewölbte Brücken zwar mit gewissen ästhetischen Einschränkungen, jedoch absolut standsicher mit kleinen Steinmaterialien erbaut werden können. Diese seien unter Verwendung hydraulischen Mörtels zu verbauen, der schnell erhärte [Bruyère 1823, S. 16].¹⁸⁹ Nur kurze Zeit später entdeckte der französische Ingenieur Jean Auguste Philibert Alexandre Lacordaire einen stark hydraulischen natürlichen Kalk. Dieser sogenannte Pouilly-Zement war den englischen Konkurrenzprodukten wie dem Parker-Zement sogar überlegen.¹⁹⁰ Im Jahr 1829 baute Lacordaire mit seinem schnell abbindenden Zement zwei Brückengewölbe. Zum einen war dies die Überwölbung eines Baches bei Créancey (Abbildung 4.8). Das Gewölbe wurde aus Beton ausgeführt, wobei der Schotter zum Zeitpunkt des Einbaus in den Mörtel aus Zement und Sand eingemischt wurde. Lacordaire berichtet, er habe die Mischung regellos auf die Schalung gegeben und auf diese Weise das Gewölbe ohne Unterbrechung Schicht für Schicht erstellt. Die Dicke des Bogens habe 40 cm am Widerlager sowie 25 cm am Scheitel betragen. Das Gewölbe verfüge über eine Spannweite von 3,40 m und gleiche einem einzigen Stein. Bereits zwei Stunden nach der Betonage habe er ausrüsten lassen¹⁹¹ [N. N. 1832, S. 183]. Einen

¹⁸⁸ Zu Viktoriastadt vgl. beispielsweise [Kahlow 1999, S. 19–23] und [Czymay 1999]; zu Vorwohle vgl. beispielsweise [Liebold 1875, S. 48–49]; [Liebold 1880, S. 38–39]; [Seeliger 2004, S. 50–54]. Auf eine ausführlichere Betrachtung wird hier verzichtet.

¹⁸⁹ Original: „on peut construire des ponts en maçonnerie, beaucoup moins beaux à la vérité, mais très-solide, en réduisant les dimensions des arches et n’employant que de très-petits matériaux, tels que la brique et le moellons, liés avec des mortiers hydrauliques qui ont la propriété de durcir promptement et dont les avantages ne sont pas encore assez généralement appréciés à leur juste valeur.“

¹⁹⁰ Der Untersuchungsbericht von Charles-François Mallet (1766–1863) dazu erschien in mehreren Zeitschriften [Mallet 1829]; [Mallet 1828]; [Mallet 1831]; [N. N. 1831].

¹⁹¹ Original: „la voûte fut faite sur un cintre en planches très-léger avec un béton composé de $\frac{1}{4}$ ciment, $\frac{1}{4}$ sable quartzueux, $\frac{1}{2}$ pierre cassée d’une grosseur analogue à celle employée pour l’empierrement des routes. La pierre ainsi cassée fut incorporée au mortier de ciment et sable au moment de l’appliquer. Le tout fut jeté pêle-mêle sur le cintre, et la voûte fut achevée ainsi sans interruption, au moyen de couches juxtaposées. L’épaisseur de la voûte aux naissances est de 40 centimètres et de 25 centimètres seulement à la clef. Son

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Hauptvorteil der Bauweise sah man darin, dass sie sehr stabil, dennoch kostengünstig sei, da sie keine Fachkräfte erfordere. Man müsse nur darauf achten, den Beton sorgfältig zu mischen [N. N. 1832, S. 183–184].

Nach den positiven Erfahrungen baute Lacordaire ebenfalls 1829 eine Straßenbrücke über den Armançon in Éguilly (Abbildung 4.9). Diese verfügte bereits über eine Lichtweite von 10 m. Ein bauzeitlicher Bericht beschrieb die Brücke als erstaunlich in Kühnheit und Leichtigkeit. Ihr Bogen sei extrem flach [N. N. 1832, S. 184]. Sie sei durchgängig mit dem in dieser Region vorhandenen plattigen Steinmaterial erbaut worden, das radial in den Bogen gesetzt und im Zusammenhang mit dem hydraulischen Zement eine dermaßen durchgängige Masse ergebe, dass die Konstruktion wie ein monolithischer Stein auf den Widerlagern liege [N. N. 1832, S. 184]. Lacordaire verfolgte den Brückenbau selbst nicht weiter, dennoch sind seine beiden Projekte als Vorbilder für andere Betonbogen zu werten, insbesondere für die im Folgenden beschriebenen Bauten der Brüder Lebrun,¹⁹² wengleich François-Martin Lebrun in seiner ersten Monographie in keiner Weise Bezug auf die Arbeiten Lacordaires nimmt [Lebrun 1835].

Anfänglich stießen die Lebruns mit ihren Betonbauten auf Widerstand; ein 1832 erscheinender Bericht von Charles Pierre Gourlier über eine Publikation von François-Martin Lebrun ergab folgendes Urteil: *„Im Allgemeinen scheint uns auch, daß weder der Steinmörtel, noch irgend eine andere ähnliche Substanz für sich allein zur Bildung des Körpers eines Gewölbes von so geringer Dicke angewendet werden dürfe; und zwar aus dem Grunde, weil wenn durch die Senkung des Bodens oder aus irgendeinem anderen Grunde der geringste Bruch in dem Gewölbe entstände, nothwendig das Ganze in Gefahr käme einzustürzen.“* [Gourlier 1832a, S. 118].

Dem verbreiteten Misstrauen begegneten die Lebruns mit der Verwirklichung von Bauten sowie deren Probelastungen, um die Eignung zu beweisen; auch hier zeigten sie sich als glühende Verfechter der Bauweise. So schrieb François-Martin Lebrun in seiner Monographie zur Verwendung von Beton: *„Trotz dem, daß alle Wahrscheinlichkeiten eines glücklichen Erfolges für den Gebrauch des Steinmörtels sprechen, so kann man doch mit Recht einwerfen, daß die Erfahrung noch nichts in dieser Beziehung beurkundet habe, und daß es daher gefährlich wäre, sich in eine derartige Unternehmung einzulassen. (...) Folgt aber daraus, daß die Erfahrung die Lösung dieses Problems in unsern Gegenden noch nicht herbeigeführt hat, daß man auf seine Unternehmung verzichten müsse. Hat man nicht nach angestellten Versuchen das Verfertigen schwebender eiserner oder aus Eisendraht verfertigter Brücken angenommen? Ist man nicht sogar genöthigt, diese fertigen Brücken Proben zu unterwerfen und bei jeder derselben die nemlichen Versuche des Druckes zu erneuern? Gut! warum sollte man nicht auch Versuche im Großen über die Festigkeit der Steinmörtel anstellen, die zu Verfertigung der Widerlager, Pfeiler und Brückenbögen angewandt werden.“*¹⁹³ [Lebrun 1837, S. 76–77].

ouverture est de 3 m. 40 c. sur une largeur de 30 mètres; elle ressemble à une large dalle d'une seule pièce. Deux heures après son achèvement, le cintre a été enlevé.“

¹⁹² Vgl. Kap. 3.2.3.

¹⁹³ Original (französische Ausgabe): „Malgré que toutes les probabilités de réussite soient en faveur de l'emploi du béton, on peut objecter avec raison, que l'expérience n'ayant encore rien constaté à cet égard, il

Die Verwirklichung der Bauten – teilweise auf eigene Kosten – deren Probelastungen sowie zahlreiche Publikationen insbesondere von François-Martin Lebrun sollten die Bauweise mit Beton in der Folge einem breiteren Publikum bekannt machen. Die erste projektierte Brücke der Lebruns war ein Vorschlag für eine dreibogige Brücke in St-Paul-de-Damiate mit bis zu 23 m Spannweite (1831). Wurde der Urheber der Planung zu dieser Brücke in der Publikation von 1835 [Lebrun 1835, S. 107, deutsch: Lebrun 1837, S. 76–77] nur allgemein als „*ein Konzessionär*“ bezeichnet, so wird erst später – mit der Publikation von 1843 – klar, dass es sich auch hier um ein Lebrunsches Projekt handelt: François-Martin Lebrun beschreibt denselben Sachverhalt, nennt aber seinen Bruder als Einreichenden des Entwurfs [Lebrun 1843, S. 130–131]. Die Brücke war in Mauerwerk ausgeschrieben worden, Jean-Auguste Lebrun jedoch wollte „*auf seine Kosten und Gefahr die Widerlager, Pfeiler und Gewölbe (...) aus Steinmörtel*“, also aus Beton bauen [Lebrun 1837, S. 77].

Vom zuständigen Prüfenieur wurde der Entwurf schließlich abgelehnt, weil er bezweifelte, dass bei solch großen Betonmassen eine einheitliche Qualität geliefert werden könne. Des Weiteren misstraute er den Materialeigenschaften hinsichtlich der auftretenden Bewegungen beim Ausrüsten sowie bezüglich der durch Fuhrwerke hervorgerufenen dynamischen Lasten. Lebrun „beantwortete“ diese Zweifel des Prüfenieurs, indem er die Homogenität des Betons herausstellte, durch die sogar eine bessere und gleichmäßigere Qualität im Vergleich zu Mauerwerk erzielt werden könne. Durch die fehlenden Fugen seien darüber hinaus weniger Probleme beim Ausrüsten zu erwarten, weil der Beton zu diesem Zeitpunkt bereits eine so hohe Festigkeit habe, dass die Bewegungen im Brückenbogen kaum wahrnehmbar seien [Lebrun 1837, S. 79–80]. Diese Homogenität des Baustoffs stand bei ihm an oberster Stelle, weswegen er durch andere Baumeister vorgeschlagene Einlagen kategorisch ablehnte: „*Was die senkrechten und wagrechten Bänder anbetrifft, welche einige Baumeister in die Masse der Gewölbe aus Steinmörtel zu nehmen vorgeschlagen haben, so meine ich, daß es von Wichtigkeit ist, sie nicht anzunehmen, um diesem Stoffe alle nur mögliche Gleichförmigkeit zu erhalten.*“ [Lebrun 1837, S. 86].¹⁹⁴ Das einzige andere Material, das Lebrun zur Ausführung empfahl, waren Ziegelverblendungen an den Kanten, da der Beton in der Fläche jeder Stoßbelastung widerstehen könne, jedoch Kanten vielleicht zu leicht abbrechen könnten [Lebrun 1837, S. 86].

Diese Art der Ausführung lässt sich bis heute an der ersten wirklich gebauten Brücke der Brüder Lebrun erkennen. Die Brücke von Villemade (Abbildung 4.10),¹⁹⁵ die die Straße nach Piquecos bis heute über den Bach Dagrán führt, wurde von Lebrun in seinem „*Traité*

serait peut-être dangereux de se hasarder dans une entreprise de cette nature. (...) Mais de ce que l'expérience n'a pas encore amené la solution de ce problème dans nos contrées, s'ensuivrait-il qu'il faudrait renoncer à l'entreprendre? N'est-ce pas d'après des expériences faites, que l'on a adopté le système de ponts en fer ou en fil de fer, suspendus? N'est-on pas même obligé de soumettre à des épreuves ces ponts terminus, et de renouveler pour chacun d'eux les mêmes expériences de pression? Eh bien, pourquoi ne ferait-on pas des expériences en grand, sur la résistance des bétons employés à la construction des culées, des piles et des voûtes de ponts.“ [Lebrun 1835, S. 105–106].

¹⁹⁴ Original (französische Ausgabe): „Quant aux chaînes verticales et horizontales que quelques constructeurs ont proposé d'introduire dans les massif des voûtes en béton, je pense qu'il est important de ne pas les adopter, afin de conserver à cette matière toute l'homogénéité possible.“ [Lebrun 1835, S. 120]. In seiner späteren Monographie jedoch befürwortete er das Einlegen von Ziegelbändern, vgl. Fußnote 181.

¹⁹⁵ Beschreibung im Katalog unter I17.

pratique de l'art de bâtir en béton" von 1843 beschrieben [Lebrun 1843, S. 172–174]: Sie besteht einschließlich der Widerlager und des Bogens komplett aus Beton. Lediglich die Stirnflächen des Gewölbes sowie die Ecken der Widerlager wurden mit Ziegeln verblendet. Da allerdings noch vor der endgültigen Erhärtung des Betons starker Frost auftrat, kam es zu Schäden am Beton, die Lebrun dazu veranlassten, die Brücke zunächst bis ins Frühjahr des folgenden Jahres 1836 auf dem Lehrgerüst zu belassen. Nach dem Ausrüsten wurden die Schäden repariert, indem die Widerlager mit einer Schicht Ziegel verkleidet wurden [Lebrun 1843, S. 172–174]. Somit ist heute nur noch am Intrados die Betonoberfläche sichtbar (Abbildung 4.11).

Sowohl die bei Lebrun angegebene Lichtweite von vier Metern als auch das Stichmaß von einem Meter konnten durch ein Aufmaß vor Ort bestätigt werden. Die von Lebrun angegebene Scheitelstärke von 60 cm entspricht jedoch nicht mehr dem heutigen Befund (ca. 40 cm), der durch die neuzeitlich aufgesetzte, verbreiterte Stahlbeton-Fahrbahnplatte gestört ist. An der Untersicht der Brücke sind die Abdrücke der rund 11 cm breiten Schalbretter noch ablesbar, so dass man davon ausgehen kann, dass man die originale Betonoberfläche vor sich hat. Die vollflächige Schalung bestätigt die Verwendung eines konventionellen Lehrgerüsts [Lebrun 1843, S. 174]. Weitere Spuren des Herstellungsprozesses sind am Bauwerk nicht abzulesen; insbesondere hat das Einbringen und Stampfen des Betons „in horizontalen Schichten von höchstens 25 bis 30 Zentimeter Dicke“ [Lebrun 1843, S. 88] keine ablesbaren Spuren am Intrados des Bogens hinterlassen. Insgesamt wirkt die leicht gelbliche Betonoberfläche recht porös.

An einigen Stellen, die stärker abgewittert sind, ist der Zuschlag aus Rundkorn deutlich sichtbar. Entsprechendes Material konnte angesichts der unmittelbar benachbarten Gebirgsflüsse Aveyron und Tarn sicher unweit der Baustelle gewonnen werden. Am Objekt konnten Korndurchmesser von bis zu 90 mm gemessen werden. Allerdings kann nicht ausgeschlossen werden, dass im Inneren des Betonmassivs auch größere Korngrößen verarbeitet worden sind. Die stellenweise blankgewitterten Zuschlagskiesel lassen vermuten, dass die Adhäsion des hydraulischen Kalkmörtels an die Steine geringer war als bei Verwendung modernen Portlandzements. Die stellenweise recht tief reichende Abwitterung ist eine Folge der Frost- und Hochwasserereignisse, die im Mündungsgebiet der notorisch hochwassergefährdeten Flüsse Aveyron und Tarn erfolgten.

Die beinahe zeitgleich erbaute Brücke von Castelsarrasin¹⁹⁶ (1836) über den Bach Lazin¹⁹⁷ sollte die von einem Hochwasser zerstörte Vorgängerbrücke ersetzen. Aus Kostengründen fiel die Entscheidung auf Beton statt auf Ziegelmauerwerk. Die Brücke wies ebenso wie die Vorgängerbrücke in Villemade eine Spannweite von 4 m bei einer Breite von 8 m auf. Diese Brücke wurde in lediglich 35 Tagen hergestellt. 18 Tage nach der Fertigstellung wurde ausgerüstet und bereits nach einem weiteren Monat wurde die Brücke für den

¹⁹⁶ In der Nähe von Montauban, Frankreich.

¹⁹⁷ heute Ruisseau de l'Azin.

vollen Verkehr freigegeben, ohne dass es durch die starke Nutzung von Fuhrwerken irgendwelche Anzeichen von Schäden gab.¹⁹⁸

Das Bauwerk, das Lebrun selbst jedoch als „*das wichtigste Werk dieser Art*“ [Lebrun 1843, S. 4] bezeichnete, war die Brücke von Grisolles über den Canal latérale à la Garonne.¹⁹⁹ Sie wurde von Juni bis September 1840 gebaut. Lebrun wandte hier eine besondere Art der Schalung an: Aus Ziegeln und Mörtel erstellte er einen Schalungsbogen, darauf wurde der eigentliche Betonbogen erstellt (Abbildung 4.14). Dieser Ziegelbogen, der auf einer Auskragung am Widerlager aufgesetzt war, wurde im Januar 1841 rückgebaut. Viereinhalb Monate später wurde die Brücke, nachdem keinerlei Setzungen oder sonstige Veränderungen bemerkbar waren, dem Verkehr übergeben [Lebrun 1843, S. 6]. Die Brücke hatte eine Spannweite von 12 m bei einem Stich von 1,6 m. Auch hier wurden wiederum lediglich die Ecken der Widerlager mit Ziegeln verblendet [Lebrun 1843, S. 7].

Die Gebrüder Lebrun hatten frühzeitig erkannt, dass der Beton im Brückenbau zu neuen Dimensionen führen würde. Bereits in seiner ersten Monographie „*Méthode pratique pour l'emploi du béton*“ von 1835 konstatierte François-Martin Lebrun: „*Die härtesten und festesten Materialien sind unstreitig am meisten zur Erbauung von Brücken geeignet.*“²⁰⁰ [Lebrun 1837, S. 75]. Aufgrund der Eigenschaften des Betons, nach Fertigstellung an Festigkeit zuzunehmen, empfahl er die Ausbildung von Gewölben explizit im neuen Werkstoff: „*Wir haben gesehen, daß ein Gewölbe aus Bruch- oder Backsteinen, das mit einer reichlichen Menge Mörtel gemacht wurde, gewöhnlich nach Verlauf von einem halben Jahre eine solche Festigkeit erlangte, daß sie nur ein einziges Stück bildete, das frei von allem Drucke war. Dieser Erfolg ist noch rascher und zuverlässiger bei den Gewölben aus Steinmörtel.*“²⁰¹ [Lebrun 1837, S. 80].

Die Bauten der Gebrüder Lebrun auch nur annähernd vollständig zu beschreiben, ist wohl nicht möglich.²⁰² Dadurch übten sie ohne Zweifel einen entscheidenden Einfluss auf den Betonbau und auch auf den Bau von Betonbrücken aus, dennoch haben sie den Betonbrückenbau nicht „erfunden“: Sie konnten bereits auf Erfahrungen anderer Ingenieure zurückgreifen. Die Konstruktion Lacordaires von Créancey kann als unmittelbares Vorbild für Lebruns errichtete Dagraanbrücke zwischen Villemade und Piquecos betrachtet werden, in den Abmessungen und der Bauweise sind beide Bauwerke

¹⁹⁸ Eine von der Verfasserin durchgeführte Begehung des Bachlaufs Ruisseau de l'Azin von der Garonne-Mündung bis hinter Castelsarrasin ergab, dass im Zentrum von Castelsarrasin eine historische Betonbrücke vorhanden ist, die in den Abmessungen passen könnte (Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13). Aufgrund der Randbedingungen – die Brücke ist von beiden Seiten unzugänglich, die Ansichtsfläche ist überarbeitet, Fotos konnten lediglich durch einen hohen Zaun hindurch aufgenommen werden – kann nicht gesichert gesagt werden, ob das die originale Brücke ist. Eine Anfrage beim Bürgermeisteramt von Castelsarrasin verlief erfolglos.

¹⁹⁹ Eine Vor-Ort-Begehung zeigte, dass diese Brücke nicht mehr vorhanden ist.

²⁰⁰ Original (französische Ausgabe): „Les matériaux les plus durs et les plus résistants [sic], sont sans contredit les plus propres à la confection des ponts.“ [Lebrun 1835, S. 105].

²⁰¹ Original (französische Ausgabe): „Nous avons vu qu'une voûte en moellons ou en briques, formée avec une abondante quantité de mortier, acquerrait ordinairement, au bout de six mois, une telle consistance, qu'elle ne formait plus qu'une seule pièce, exempte de poussée. Cet effet est encore plus prompt et plus certain pour les voûtes en béton.“ [Lebrun 1835, S. 111].

²⁰² Vgl. Werkverzeichnis in [Rico 2001, ab S. 88].

vergleichbar. Und auch bei den Brücken von Éguilly und Grisolles lassen sich gewisse Ähnlichkeiten ausmachen. Wie bereits weiter oben festgestellt, nannte Lebrun Lacordaire nicht als Vorbild. Spätestens nach dem Bau seiner Brücke von Grisolles musste er jedoch Lacordaires Leistung anerkennen. In einem Bericht über die genannte Brücke attestierten die Experten, der Erfolg von Lebrun beim Bau der Brücke von Grisolles könne nicht bezweifelt werden. Allerdings sei der Bau von Gewölben aus Beton keine Neuheit. Einer Beschreibung römischer Gewölbe folgt die Aussage, dass im Osten Frankreichs schon lange Beton verwendet werde, auch für Gewölbe. Auch hier werden Beispiele genannt, jedoch seien die schönsten modernen Beispiele dieser Art bis zum Bau der Brücke von Grisolles zweifelsohne die Gewölbe von Lacordaire gewesen, die seit 15 Jahren bestehen [Thury 1841, S. 301].²⁰³ Lebrun geht in seinem Buch kurz auf den Vorwurf ein, er habe die Idee des Betonbrückenbaus lediglich von Lacordaire kopiert, und verteidigt sich mit dem Hinweis, bei Lacordaire hätten „spezielle Umstände“ die Wahl der Konstruktionsart veranlasst [Lebrun 1843, S. 11]. Weiterhin formuliert er den soeben zitierten Bericht [Thury 1841, S. 301] entscheidend um: Die Kommission habe die Brücke von Grisolles als das schönste Beispiel dieser Art anerkannt, wofür er sich bedanke [Lebrun 1843, S. 11].²⁰⁴

Auch aus der französischsprachigen Schweiz ist ein frühes Brückengewölbe von 1840 überliefert [Herosé 1893]. Die erst im Jahr 1893 in der Schweizer Bauzeitung erschienene Notiz über die aufgefundenen bauzeitlichen Archivalien benennt die Aarauer Zementfabrik als ausführende Firma. Die Brücke in Erlisbach sei komplett aus einem Beton mit Aarauer Romanzement, „gewöhnlichem Mörtel“ aus Sand und fettem Kalk sowie Kies erbaut worden [Herosé 1893, S. 7]. Sie verfüge über eine Lichtweite von 7,20 m und eine Bogenstärke von 36 cm [Herosé 1893, S. 7–8]. Den Bogen betonierte man in Keilsteinen: Dazu habe man an beiden Bogenenden Bretter in der benötigten Höhe aufgestellt. Weiter habe man etwa 30 cm breite Felder abgeteilt, indem man Schalungen aufstellte und das so entstandene Feld mit Beton füllte. Dies habe man dann auf der anderen Seite des Lehrgerüsts ebenso ausgeführt [Herosé 1893, S. 8].²⁰⁵ Zum Zeitpunkt der Publikation, also 1893, befinde sich die Brücke noch in tadellosem Zustand [Herosé 1893, S. 7].

Mit einem ähnlichen Bindemittel wie jenem von Pouilly, nämlich mit dem Vassy-Zement und wenig bearbeitetem Stein bauten die Unternehmer und Besitzer des Vassy-

²⁰³ Original: „mais les plus beaux exemples de construction modernes de ce genre, jusqu’au moment où M. Lebrun jeune a construit le pont de Grisolles, étaient indubitablement les voûtes faites il y a quinze ans environ, au canal de Bourgogne, en ciment de Pouilly, par M. de Lacordaire, ingénieur en chef des ponts-et-chaussées, chargé de la direction des travaux du point de partage de ce canal.“ Eine weitere Nennung Lacordaires im Zusammenhang mit Gewölben aus Beton erfolgte hier: „Déjà, au canal de Bourgogne, M. Lacordaire, ingénieur, avait élevé des constructions en béton composé avec la chaux hydraulique de Pouilly.“ [N. N. 1840, S. 478].

²⁰⁴ Original: „Mais, à part quelques circonstances particulières qui avaient déterminé M. de Lacordaire, ingénieur en chef, à construire des voûtes en béton pour servir d’épreuve à la bonté du ciment de Pouilly, la commission de l’académie reconnaît, et je l’en remercie, que le pont de Grisolles est le plus bel exemple de constructions modernes de ce genre.“

²⁰⁵ Original: „Au deux bouts de la voûte on a élevé et cloué des planches de hauteur requise pour retenir le béton. Ensuite on a fait des compartiments d’environ un pied (30 cm) d’épaisseur et de la longueur du pont, soit de 7,20 m en dressant une planche de cette longueur du pont à la distance d’environ un pied en avant et l’on a rempli l’intervalle de béton.“

Zementwerks, Gariel und Garnier, den Pont-aux-Doubles²⁰⁶ in Paris mit 31 m Lichtweite. Um das Gelingen dieses Baus zu gewährleisten erstellten sie zuvor in den Jahren 1844–1845 einen Probebogen in Vassy mit den Bogenabmessungen der geplanten Brücke [N. N. 1852]. Dieser Bogen wurde dann verschiedenen Belastungstests unterzogen, die äußerst erfolgreich verliefen und damit die Herstellung des Pont-aux-Doubles in derselben Weise begründeten [N. N. 1852, S. 74]. Wie unregelmäßig man sich den Bruchstein dieser Brücke vorstellen muss, bleibt unklar, da das französische Wort *moellon* auch Steine bezeichnen kann, die man sonst schon als Werkstein-Quader betrachten würde, nur in kleinerem Format.

Eine weitere Ausführung der Unternehmer Gariel und Garnier ist die Wasserversorgung für das Städtchen Avallon [N. N. 1852, S. 68]. Die im Jahre 1847 ausgeführten Arbeiten standen unter der Oberleitung des Ingenieurs Eugène Belgrand. Dieser differenzierte genau zwischen Kiesbeton und Bruchsteinmauerwerk mit Zementmörtel [Belgrand 1850, S. 413]. In der letztgenannten Technik²⁰⁷ wurde die Aquäduktbrücke in Avallon²⁰⁸ mit 31 m Lichtweite erbaut [N. N. 1852, S. 68; Abbildung 4.15]. Belgrand beschrieb in einem Aufsatz, man habe zunächst eine erste Bogenschicht mit 30 cm Dicke ausgeführt und erst dann habe man dem Bogen die endgültige Stärke gegeben [Belgrand 1850, S. 427]. Trotz dieser Maßnahme haben sich Risse im Kämpferbereich gezeigt. Belgrand empfahl deshalb, bei künftigen Bauwerken mit schnell erhärtendem Zement zunächst Lücken zu lassen und diese Lücken erst ganz am Ende auszufüllen [Belgrand 1850, S. 443]. Belgrand beschrieb, dass sein Mauerwerk wegen des unregelmäßigen Steinmaterials bis zu 34 % aus Zementmörtel bestehe [Belgrand 1850, S. 444]. Die Bauweise ist deshalb bereits als betonähnlich zu werten. Belgrand betonte allerdings, dass der verwendete Beton nicht vorab vollständig gemischt werde, sondern in abwechselnden Schichten aus Mörtel und größeren Zuschlägen eingebaut werde [Belgrand 1850, S. 450].

Ein Unikum, das nur schwer in den Kontext des frühen Betonbrückenbaus einzuordnen ist, ist das Brückchen im Jardin des Plantes²⁰⁹ in Grenoble von Louis-Joseph und Joseph Vicat, das angeblich aus dem Jahre 1855 stammt (Abbildung 4.16). Dieses Brückchen verfügt über eine Spannweite von 2,40 m und wurde aus einzelnen Betonsteinen von 25 bis 50 cm Länge zusammengesetzt und mittels Eisenstäben und keilförmigen Splinten verspannt (Abbildung 4.17). Augenscheinlich wurden die Eisenstäbe lediglich eingeschoben und nicht einbetoniert. Merkwürdig ist hier, dass diese Bauweise zu der angegebenen Zeit eine absolut herausragende Konstruktion war – ein erster Vorbote der Spannbetonbauweise. Jedoch wurde weder in Vicats 1856 erschienener Monographie [Vicat 1856] über die Herstellung und Anwendung von Zementen noch in den einschlägigen Fachzeitschriften über diese Brücke berichtet. Die Art der Herstellung lässt vermuten, dass eine mobile Konstruktion erwünscht war, die also eine Montage und zerstörungsfreie Demontage

²⁰⁶ Die ursprüngliche Brücke besteht nicht mehr. Das heute an der gleichen Stelle über den Seinearm bestehende Bauwerk wird in der Schreibweise Pont au Double genannt, die historische Schreibweise ist allerdings Pont-aux-Doubles [vgl. Claudel, Laroque 1859, S. 418–420]. Diese Brücke wird unter verschiedenen Aspekten noch in den Kap. 6.2.2 und 6.3.4 behandelt.

²⁰⁷ Ein Artikel in der Allgemeinen Bauzeitung präzisiert: „Die Wasserleitung besteht aus zwei starken aus dem Cement von Vassy und aus kleinen Bruchsteinen geformten Stücken (...)“ [N. N. 1852, S. 68].

²⁰⁸ Diese ist heute nicht mehr vorhanden.

²⁰⁹ Beschreibung im Katalog unter I9.

ermöglichte. Dies ließe auf die Nutzung als Ausstellungsobjekt schließen, jedoch konnte auch mit der einschlägigen Literatur über diverse zeitgenössische Ausstellungen, insbesondere die Weltausstellung 1855 in Paris, diese These weder bestätigt noch widerlegt werden.

Die nächsten beiden Brücken sind wiederum unter der Leitung Eugène Belgrands in den Jahren 1863–1865 entstanden [N. N. 1867]. Bei Montry, östlich von Paris, sind bis heute zwei Brücken²¹⁰ des Dhuis-Aquäduktes der Pariser Trinkwasserversorgung erhalten (Abbildung 4.18). Sie überführen die Wasserleitung über den Fluss Grand Morin sowie über seinen Seitenkanal. Nach eigener Messung betragen die Lichtweiten der Brücken 14 m und 19,4 m. Zum Bau wurde vor Ort anstehendes, sehr poröses Sedimentgestein verwendet, welches naturgemäß bereits nur in kleineren Abmessungen vorkommt und somit nicht zur Herstellung von Werksteinen geeignet war. Ob der Beton bereits fertig gemischt eingebaut wurde, ist nicht gesichert. Allerdings zeigt das Mauerwerk der beiden Aquäduktbrücken eine völlig unregelmäßige Struktur unbearbeiteter Brocken von unterschiedlicher Größe bis 40 cm Durchmesser (Abbildung 4.19). Die Ausführungsweise nähert sich hier der „echten“ Betonbauweise weitgehend an. Möglicherweise trug die weit abgelegene Lage der beiden Bauwerke zu der Wahl dieser schlichten Bauart bei. In jedem Fall ist darin der Grund zu sehen, dass die beiden Dhuis-Brücken keinerlei Niederschlag in der zeitgenössischen Fachliteratur gefunden haben; ein weiterer Grund mag sein, dass sie in den Abmessungen den beiden damals bereits fast zwanzig Jahre alten Brücken in Avallon und Paris deutlich nachstanden.

Die Erfahrungen im Betonbau führten im Weiteren zu den weithin bekannten Bauten des Vanne-Aquäduktes²¹¹ der Pariser Trinkwasserversorgung. Wiederum war Eugène Belgrand der verantwortliche Ingenieur, gebaut wurde unter maßgeblicher Beteiligung des Unternehmers François Coignet unter Verwendung von Kiesbeton. Kleinere Brückenbauten aus dessen Hand lassen sich spätestens ab 1855 nachweisen,²¹² das bekannteste der Werke Coignets jedoch ist zweifelsohne der Vanne-Aquädukt. Dieser verläuft auf einer Länge von 173 km, davon 16,6 km *„unterstützt durch Arkaden“* [Belgrand 1882, S. 199]. Die großen Bauwerke des Vanne-Aquäduktes mit Spannweiten bis zu 40 m²¹³ wurden in den Jahren 1867–1874 nach dem *„System Coignet“*, also in Stampfbeton ausgeführt. Die verschiedenen Bauwerke bestehen größtenteils bis heute; eine Vor-Ort-Untersuchung aller oberirdischen Brückenbauwerke im Herbst 2013 zeigte

²¹⁰ Beschreibung im Katalog unter I7.

²¹¹ Beschreibung im Katalog unter I15.

²¹² Vgl. beispielsweise den Text seines Patents. Dort werden ausgeführte Bauwerke aufgeführt, unter anderem auch *„pour les ponts de petite portée“*, also für kleinere Brücken [Coignet 1855a, S. 9]. Vgl. auch die Aussage, Beton sei geeignet für Brücken, Durchlässe und Viadukte [Coignet 1855b, S. 9].

²¹³ Der Pont-sur-Yonne verfügte über eine Lichtweite von 40 m. Er wurde im Zweiten Weltkrieg zerstört. Eine ausführliche Beschreibung dieses Bauwerks liefert beispielsweise [Séjourné 1913a, S. 210–219]; eine Betrachtung des gesamten Projektes enthält das Buch von Belgrand, zu den Aquädukten siehe insbesondere [Belgrand 1882, S. 198–238]. Aquädukt bei Morêt-sur-Loing in [Oppermann 1873]. Darüber hinaus gibt es zahlreiche weitere Quellen, historisch wie modern. Da diese Bauwerke vielfach beschrieben wurden, wird hier auf eine weitere Vertiefung des Themas verzichtet.

allerdings, dass sich zumindest die Betonbauwerke heute überwiegend in stark verändertem Zustand befinden.²¹⁴

An den in neuester Zeit noch nicht überarbeiteten Bauwerken des Vanne-Aquädukts – insbesondere an der Arkadenreihe zwischen Gisy-les-Nobles und Villeperrot von 1872 (Abbildung 4.20) – lagen am Intrados die originalen Betonoberflächen noch frei (Abbildung 4.21). Im Allgemeinen zeigen die Untersichten der Bögen erstaunlich detaillierte Schalbrettabdrücke mit deutlich sichtbaren Maserungen und Astlöchern. Dies ist nicht zuletzt darauf zurückzuführen, dass die Oberfläche mehr an Mörtel als an Beton erinnert: An einigen Stellen, an denen die Oberfläche stärker verwittert ist, zeigt sich eine äußerst kleinteilige Zusammensetzung des Betons. Lediglich einzelne Körner wiesen eine Größe bis zu 30 mm auf. Ob sich im Inneren größere Zuschläge befinden, konnte natürlich nicht bestimmt werden.

4.3 Erste Bogenbrücken aus Beton im deutschsprachigen Raum

Parallel zum Aufstieg des Betons zum Material für Großprojekte in Frankreich in den 1850er und 1860er-Jahren konnte sich die Betonbauweise auch im deutschsprachigen Raum etablieren. Johann von Mihálik baute in den Jahren 1854–1856 die Franz-Joseph-Schleuse.²¹⁵ Er beschäftigte sich in diesem Rahmen sehr intensiv mit den verschiedenen Anwendungen von Beton, jedoch war die Ausführung von Gewölben aus diesem Baustoff noch nicht ausreichend erforscht: *„Eine für die Ausführung von Béton-Gewölben anwendbare, die Ermittlung ihrer Stärke bezweckende Theorie, besteht noch nicht, und dürfte eine solche auch nicht leicht gefunden werden.“* [Mihálik 1858, S. 184]. Kurzerhand erstellte Mihálik aus diesem Grunde im Jahr 1855 eine Probebrücke von etwa 10 m Lichtweite aus Beton, die er ausführlichen Belastungsproben unterwarf (Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23). Die auf dem Bauhof der Franz-Joseph-Schleuse erbaute Brücke verfügte über einen elliptischen Bogen, Mihálik hatte hierbei einen der Vorteile des monolithischen Gewölbebaus erkannt: *„Bei einer Bogenbrücke, überhaupt bei einem Gewölbe aus Béton, kommt die Gewölbsform beinahe gar nicht in Betracht; denn es entfallen die in konstruktiver Hinsicht zu beachtenden Umstände, welche bei der Anwendung des Quader- oder Ziegel-Materials eine bestimmte Form bedingen, weil die ganze Béton-Decke samt Widerlager aus einer zusammenhängenden, einen einzigen Stein bildenden Masse besteht.“* [Mihálik 1858, S. 184]. Neben der freien Formfindung des Bogens beschreibt er auch den scheinbaren Vorteil, dass ein Setzen beim monolithischen Bogen nicht stattfinden könne. Risse gebe es zwar immer, Mihálik schob diese aber auf einen zu hohen Tongehalt, die falsche Behandlung des Materials oder *„eine nicht fleissige Gerüstung“* [Mihálik 1858, S. 184].

Die freistehende Probebrücke hatte eine Spannweite von ca. 30' mit einem Bogen, der im Scheitel eine Stärke von 2', an den Widerlagern von 7' aufwies [Mihálik 1858, 185].²¹⁶ Die Innenkante bildete eine Ellipse mit den Achsen 30' und 9', die Außenkante wurde durch einen Kreisbogen mit 60' Radius beschrieben [Mihálik 1858, S. 186]. Betont wurde von

²¹⁴ Siehe hierzu auch Kap. 8.

²¹⁵ Vgl. Kap. 3.1.

²¹⁶ Spannweite etwa 9,5 m, Scheitel 63 cm, Widerlager 2,2 m; 1 österreichischer Fuß: 316,080640 mm.

DER MONOLITHISCHE BOGEN

den Widerlagern her zur Mitte. Die Schalung war zuvor genässt worden, damit sie dem Beton keine Feuchtigkeit entzog. Die Betonlagen wurden hierbei senkrecht zur Krümmung der Ellipse aufgebracht und gestampft. Auf der Nordseite ließ Mihálik die Oberfläche des Betons abmeißeln, um die Witterungsbeständigkeit zu testen.

Es folgten mehrere Probelastungen der Brücke mittels beladener Wagen. Selbst das Entgleisen eines Wagens und die dadurch ausgelöste stoßartige Belastung zeigten keinerlei Veränderungen an der Brücke. Die Probelastungen wurden daraufhin eingestellt, da Mihálik davon ausging, dass mit den vorhandenen Möglichkeiten ein Versagen der Brücke nicht herbeigeführt werden konnte [Mihálik 1858, S. 189].

Nur wenige Jahre nach Mihálik ließ der bereits erwähnte E. H. Hoffmann 1857 auf der Berlin-Stettin-Danziger-Chaussee auf heute polnischem Gebiet ein kleines Brückchen aus Stampfmörtel erstellen. Dieses hatte zwar nur fünf Fuß lichte Weite, wird aber von Hoffmann ausführlich beschrieben [Hoffmann 1860]:²¹⁷ Nach Herstellen der Schalung wurde das Brückchen in einem einzigen Arbeitsgang zwischen zwei Lehren, die die Bogenstärke vorgaben, gestampft. Im folgenden Frühjahr entfernte Hoffmann ein Probestück von der Brücke. Dieses zeigte zwar poröses Material mit einer hohen Wasseraufnahmefähigkeit, dennoch wies die Brücke keinerlei Frost- oder sonstige Schäden auf. Bestätigt von den guten Eigenschaften der Brücke baute er im Verlauf der Chaussee noch weitere Brücken. Da diese allerdings direkt im Chausseebereich lagen und nicht wie die zuerst beschriebene Brücke über den Chausseeegraben führten, misstraute er seiner eigenen Konstruktion. Die Chausseebrücken änderte er konstruktiv ab, indem er zwar die erste Lage in Stampfmörtel ausführte, dann aber Pflastersteine in diese Schicht einrammte. Diese Ausführungsweise ist deshalb wiederum als eine Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise zu werten.

Hoffmann erwies sich auch weiterhin als Befürworter des Bauens mit Beton. Im Rahmen derselben Chaussee baute er ebenfalls 1857 eine schiefe Brücke mit einer Lichtweite von 14,6 Fuß,²¹⁸ deren Bauweise später als Bruchstein-Zementmörtel-Mauerwerk bezeichnet wurde [Liebold 1880, S. 119; Abbildung 4.24]. In einer nachträglichen Beschreibung ist zu lesen: Bei der Brücke sei ein bestehender hölzerner Überbau durch das Gewölbe ersetzt worden, ohne dass hierbei die Widerlager geändert worden seien. Das Gewölbe sei aus Feldsteinen mit Dirschauer hydraulischem Kalk erstellt worden. Die Vorteile dieser Bauweise seien in der Dauerhaftigkeit, Feuersicherheit und den geringen Kosten zu sehen [Röder 1867]. Wie unregelmäßig diese Feldsteine jedoch im Gewölbe angeordnet wurden, kann nicht verifiziert werden. Liebold schrieb in direktem Zusammenhang mit diesem Beispiel von einem anderen Gewölbe, dessen Bruchsteine *„im Verband und nach der Schraubenlinie trocken (...) versetzt und dann in den Fugen mit flüssigem und zugleich fettem Cementmörtel ausgegossen“* wurde [Liebold 1880, S. 119].

²¹⁷ Auch hier [N. N. 1868c].

²¹⁸ Liebold behauptet, die Brücke habe eine Lichtweite von 14,6 Metern [Liebold 1880, S. 119]. Dies ist jedoch zu bezweifeln. Sowohl in [Röder 1867] als auch in [Hoffmann 1873b, S. 66] wird sowohl im Text als auch in der Zeichnung auf Fuß als Maßeinheit verwiesen.

Um 1860 baute Johann Salzman die Pulverfabrik in Stein bei Laibach im heutigen Slowenien [Salzman 1865].²¹⁹ Neben den im Kap. 3.2.3 bereits erwähnten umfangreichen Bauten erstellte er auch fünf flachgespannte Bogenbrücken über den Werkkanal mit jeweils etwa 5,70 m Spannweite (Abbildung 4.25). 1865 stellte Salzman fest, dass die seither mit schweren Fuhrwerken befahrenen Brücken ohne die geringsten nachteiligen Veränderungen bestehen [Salzman 1865, S. 50]. Weiterhin befindet sich auf der Anlage ein Viadukt zur Übersetzung eines Feldweges mit einer Lichtweite von acht Fuß. Auch dieser sei 1860 ausgeführt worden. Nochmals wiederholt Salzman sein positives Urteil zum Betonbau: „Dieser [gemeint ist der soeben beschriebene Viadukt, Anm. d. Verf.] besteht jetzt den vierten Winter, hat Temperatur-Wechsel von 20 Grad Wärme bis eben so viel Kälte mehrmals überstanden, und erhält sich so vorzüglich, dass alle Kanten noch immer so scharf und tadellos sind, als gleich nach ihrer Ausführung. Ein Beweis, wie sehr dieses Materiale bei Strassen- und Eisenbahnbauten berücksichtigt werden sollte.“ [Salzman 1865, S. 52]. Ein Teil dieser Anlagen existiert wohl heute noch.

Auch in den folgenden Jahren fanden Versuche zum Betonbrückenbau statt, jedoch allesamt mit bescheidenen Abmessungen. Hier ist beispielsweise das Betonbrücklein in der Karlsruher Fabrik von Dyckerhoff & Widmann von 1865 zu nennen. Dieses wurde im Februar des Jahres erstellt. In einem Brief an seinen Vater im April 1865 schrieb Rudolf Dyckerhoff, dass sich dieselbe gut bewähre. „Das Gewölbe ist 3 Zoll dick gegossen mit Beton aus 1 Ct. 3 Sand 4 Steine (u. 1/6 Kalk) nach einem Tag wurde die Verschaalung weggenommen u. ich konnte darauf stehen, heute nach 8 Tagen liegen die Schienen darauf u. fahren die mit Steinen geladenen Wagen (25 Ctr.) darüber. Das Gewölbe hat 8 Zoll Sprung und 4' Weite (Spannung). Der Kopf des Gewölbes ist mit rothem Ct. verputzt. Die Mauern u. Wiederlager auf die sich das Gewölbe stützt sind 4“-6“ dick gegossen aus 1 Ct. 4 Sand 6 Stein.“ [DMA, Sign. FA 010, Bü 011, S. 23].

In der Schweiz wurde ebenfalls ein entsprechendes Projekt durchgeführt [DMA, Sign. FA 010/266, S. 23–28].²²⁰ In Schaffhausen sollte der dortige Gerberbach überwölbt werden. Dabei wurde zu Beginn das Tonnengewölbe mit 16 Fuß Lichtweite mit dem vorhandenen Jurakalk gemauert. Positive Erfahrungen bei Fundamentierungen anderer Gebäude veranlassten den zuständigen Stadtbaumeister Meyer auch bei der Gerberbachüberwölbung mit Stampfbeton zu experimentieren. Im Frühjahr 1868 ließ er daher ein Teilstück aus Beton erstellen (Abbildung 4.26). Dieser Versuch hatte einen derart „günstigen Erfolg“, dass der Stadtrat sich entschloss, den verbliebenen Teil in Beton ausführen zu lassen. Meyer hatte festgestellt, dass die Ausführung mit Beton die Kosten um ca. 20–25 % senkte, darüber hinaus konnten sowohl der Bogen als auch die Widerlager schwächer ausgeführt werden als bei der Verwendung des Mauerwerks aus Jurakalk [DMA, Sign. FA 010/266, S. 23–24].

Nach dem Bau der Chausseebrücken von 1857 vergingen mehrere Jahre ohne dass von E. H. Hoffmann weitere eigene Brückenbauten nachgewiesen werden können. Erst 1872 schrieb er über seinen Entwurf einer Brücke bei Lübars [Hoffmann 1872a, S. 260–261]. Diese Brücke wurde komplett aus „Konkret“ geplant. Insbesondere der Vergleich der

²¹⁹ Vgl. Kap. 3.2.3.

²²⁰ Vgl. auch [Hoffmann 1873a].

Kosten ließ ihn von der alternativen Holzkonstruktion abkommen und für die massive Brücke plädieren. Gebaut wurde die Brücke letztlich aber doch in Ziegelbauweise, da zu dieser Zeit einige Fälle bekannt wurden, in denen der verwendete Zement trieb [Hoffmann 1872a, S. 260–261].

In Deutschland blieb die Stimmung zurückhaltend: Noch 1880 – die französischen Bauten wie etwa der Vanne-Aquädukt hatten die Eignung des Stampfbetons auch für große Spannweiten längst nachgewiesen – schrieb Bernhard Liebold: *„Wenn trotz dieser günstig ausgefallenen Versuche die neue Brückenbaumethode in Deutschland bislang noch keinen Eingang gefunden hat, während sie in England und besonders in Frankreich heute schon aufs höchste ausgebildet und entwickelt dasteht, und dort zu den kühnsten Objecten mit bedeutenden Vortheilen, anderen Bauweisen gegenüber, angewendet wird, so liegt dies wohl hauptsächlich viel mit daran, daß man bei uns den Festigkeits-Ermittelungen der Baumaterialien bis in die neueste Zeit noch viel zu wenig Gewicht beigelegt und daß man besonders die Stärke des Cementmörtels und seine Dauerfestigkeit zu sehr unterschätzt und sonst zu selten Gelegenheit gehabt hat, seine Leistungsfähigkeit kennen zu lernen.“* [Liebold 1880, S. 119].

Dagegen wurden in Frankreich, Spanien²²¹ und der Schweiz Straßenbrücken auch über die besprochenen Beispiele hinausgehend vollständig aus Beton erstellt [N. N. 1879, S. 346]. In einem Vortrag beim Architekten- und Ingenieurverein Hannover erläuterte der unbenannte Sprecher ausführlich die Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise. Eine Wortmeldung hierzu vermeldete, dass der „echte“ Beton vor der Verwendung bereitet werde, *„ein Verfahren, das in mancher Richtung dem vorher erwähnten [also der Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise, Anm. d. Verf.] vorzuziehen ist. Französische Betonbrücken aus Grenobler Cement waren auf der Pariser Ausstellung durch Modelle dargestellt. Eine Betonbrücke über den Lavale in Spanien war schon auf der Wiener Ausstellung zu sehen. In der Schweiz sind die Betonbrücken bei Genf über die London und bei Vevey über die Veveyse zu nennen.“*²²² [N. N. 1879, S. 346–347]. Die Vorteile von monolithischen Gewölben im Vergleich zum Mauerwerk seien vor allem in der schnellen und kostengünstigen Herstellung sowie in der einfacheren Ausführung von schiefen Gewölben zu sehen [N. N. 1879, S. 347].²²³ Weiterhin biete Bruchstein-Zementmörtel-Mauerwerk wie insbesondere auch der Beton Vorteile beim Bau von Brücken mit schwierigen Abmessungen, wie etwa beim Beispiel der Brücke mit nicht-parallelen Stirnen in Bornhöved [Dorrien 1886] oder bei der Vestnertorbrücke in Nürnberg, die neben dem gebogenen Grundriss auch noch über eine starke Steigung der Fahrbahn verfügte [Dyckerhoff 1888, S. 274].

²²¹ Vgl. beispielsweise die mehrfach auch in der deutschsprachigen Literatur genannten Brücken über den Lavale und den Iregua [Büsing 1892, S. 258]; [Barkhausen 1892, S. 322]; [Ržiha 1877, S. 194–195]; usw. Diesbezügliche Beschreibungen des zuständigen Ingenieurs finden sich in spanischer Sprache in [Bellsolá Bayo 1862]; [Bellsolá Bayo 1867].

²²² Bei beiden Schweizer Brücken konnte nicht zweifelsfrei geklärt werden, ob diese heute noch vorhanden sind oder nicht. Bei der Genfer Brücke ist wohl der Fluss l'Allondon gemeint, wo sich auch einige Bogenbrücken befinden. Ob eines dieser Bauwerke die angesprochene frühe Betonbrücke ist, ist weder mit Sicherheit geklärt noch widerlegt.

²²³ Zum Steinschnitt mit Spirallinien bei Ausführung schiefer Gewölbe vgl. beispielsweise [Hartmann 1858], Vorteile beim Bau schiefer monolithischer Bogen bei [Rheinhard 1887, S. 350], Beanspruchungen in schiefen Gewölben [H. 1900, S. 635].

Friedrich Wilhelm Büsing zählte in seiner Monographie zum Portland-Zement und seiner Anwendung als weitere Vorteile auf: Beim Bau mit Beton entfallen der komplizierte Fugenschnitt, deshalb könne man die Stärke des Gewölbes an jeder Stelle den Anforderungen anpassen und dementsprechend die Konstruktion wesentlich einfacher an die ermittelte Stützlinie anpassen.²²⁴ Dadurch werde das Gewölbe leichter. Weiter erfordere es keine Hintermauerung und auch eine Abdeckung könne entfallen. Durch diese Masseneinsparungen können sowohl das Gewölbe als auch die Widerlager in geringeren Dimensionen ausgeführt werden. Bei gleicher Spannweite lasse sich daher ein Betongewölbe einfacher und günstiger ausführen bzw. könne man bei gleichen Kosten größere Spannweiten erzielen [Büsing 1892, S. 251–252]. Durch die Einheitlichkeit in der Masse fallen die Schwachstellen an den im Mauerwerk vorhandenen Fugen weg. Wo also Kies und Sand vorhanden seien und wo Ziegel- und Natursteine fehlen, sei der Betonbau vorteilhaft gegenüber dem Steinbau [Büsing 1899, S. 333–334].

Die eigentliche Blüte des deutschen Stampfbeton-Brückenbaus setzt erst Ende der 1870er Jahre ein, als zum einen das Material durch die Zementnormen kontrollierbar wurde, zum Anderen aber Unternehmer wie Bernhard Liebold, Dyckerhoff & Widmann oder Feege & Gotthard begannen, die Bruchstein-Zementmörtelbauweise und die Betonkonstruktion auf breiter Front im Brückenbau zu propagieren und durchzusetzen. Die ersten Jahre Bernhard Liebolds als Unternehmer und Brückenbauer werden im Kapitel 4.5 beleuchtet.

4.4 Probobogen und Ausstellungsbrücken

„Rechnen ist nicht das Wesen des Ingenieurberufes, die Hauptsache ist das Nachfühlen der in der Natur wirkenden Kräfte. Die großen Fortschritte verdanken wir den Experimenten.“ [K. 1909, S. 215].²²⁵

Während heutige Ingenieure oft durch Regelwerke und Normen geradezu gehemmt werden, diente im ausgehenden 19. Jahrhundert die Erfahrung des verantwortlichen Baumeisters als richtungsweisend. Diese basierte einerseits auf fundierter Ausbildung in polytechnischen Schulen sowie der Weitergabe persönlicher Erfahrungen Älterer an ihre jüngeren Kollegen andererseits aber auch auf ausführlichen experimentellen Untersuchungen mit damit verbundenen genauesten Beobachtungen und deren Dokumentation und Bewertung. Versuche fanden dabei sowohl im Labor (z. B. Materialprüfanstalten) als auch an Bauwerken statt.

²²⁴ Vgl. auch die Aussage von Eugen Dyckerhoff im Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten: „Bei den Betonkonstruktionen ist man in der glücklichen Lage, die Stärken ganz genau nach den rechnerisch gefundenen und zulässigen Beanspruchungen bemessen und ausführen zu können. Man kann die Stärke des Brückenbogens ganz nach den bei der statischen Untersuchung gefundenen Drucklinien und der zulässigen Beanspruchung des Betons konstruieren und braucht deshalb nicht mehr Masse für die Bauausführung aufzuwenden als unbedingt nötig ist. Dies ist bei den Ausführungen von Brückenbogen mit Mauerwerk oder aus Quadern nicht in gleicher Weise möglich, oder doch nur unter Aufwendung höherer Kosten. Man wird deshalb bei der Annahme von Stampfbeton immer vorteilhafter konstruieren können, als mit Mauerwerk, trotz der höheren Druckfestigkeit der einzelnen Mauersteine.“ [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 114].

²²⁵ Vgl. auch eine Aussage zur Ausbildung von Versuchsgewölben, „da nur durch Versuche im Grossen die Statik der Bauconstructionen controlirt und die Frage der Zulässigkeit grosser Material-Inanspruchnahme geklärt werden kann.“ [Huss 1884, S. 92].

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Sicherlich wurden solche Versuche reihenweise – im kleineren oder größeren Stile – ausgeführt, überliefert sind dagegen nur vergleichsweise wenige.²²⁶ Im Folgenden sollen die der Verfasserin bekannten Versuche von 1835 bis 1908 dargestellt werden.²²⁷ Dabei wird hier in vorliegendem Kapitel der Fokus weniger auf die Versuchsreihen der Materialprüfanstalten gelegt, sondern vielmehr auf Probelastungen an realen Gewölben. Hierbei werden zum einen reine Versuchsbauwerke wie z. B. die bereits erwähnte Probebrücke von Mihálik genannt, deren ausschließlicher Zweck die Erprobung war. Zum anderen werden auch Ausstellungsbrücken beschrieben, die zwar in erster Linie zu repräsentativen Zwecken gebaut, die aber vor dem Rückbau oftmals auch Belastungsexperimenten bis hin zum Versagen ausgesetzt wurden. Allen gemein ist jedoch, dass sie nicht für eine dauerhafte Nutzung geplant waren – hierin liegt auch der große Vorteil für die bauzeitliche Forschung: Probelastungen an neu gebauten Brückenbauwerken waren zwar allgemein üblich. Eine Belastung ohne Rücksicht auf die Unversehrtheit der Brücke, teilweise bis hin zum Einsturz, war jedoch lediglich bei Bauten von begrenzter Nutzungsdauer praktikabel.

Harding 1835, Probegewölbe:

Beschreibung: vgl. Kap. 4.1 sowie Abbildung 4.6.

Quellen: [Harding 1837].

Gariel und Garnier 1844, Probobogen für den Pont-aux-Doubles:

Beschreibung: Probobogen für den Pont-aux-Doubles mit gleicher Lichtweite von 31 m. Ein Jahr nach der Fertigstellung wurde der Bogen verschiedenen Belastungstests unterzogen, die vollständig erfolgreich abliefen. Erst nach deutlicher Reduzierung des Querschnittes im Scheitel konnte der Bogen zum Einsturz gebracht werden (vgl. Kap. 4.2, 6.2.2 und 6.3.4; Abbildung 4.27 und Abbildung 4.28).

Quellen: [N. N. 1852]; [Claudel, Laroque 1859, S. 418–420]; [Hoffmann 1878a, S. 82–87], [Séjourné 1913c, S. 375].

von Mihálik 1855, Probebrücke:

Beschreibung: vgl. Kap. 4.3 sowie Abbildung 4.22.

Quellen: [Mihálik 1858, S. 184–189].

²²⁶ Vgl. das Zitat: „Nach einer sehr fleissigen Zusammenstellung des Herrn Ingenieur Gaertner sind in der technischen Litteratur der letzten 50 Jahre Mittheilungen über bloss zwölf an Gewölben durchgeführte Versuche zu finden.“ [Melan 1890b, S. 449]. Ob diese Zahl zuverlässig ist, sei dahingestellt. Letztlich ist keine lokale Eingrenzung gemacht, so dass in dieser Zahl auch sämtliche französischen, englischen, italienischen usw. Traktate berücksichtigt sein müssten, insofern scheint die Zahl als zu gering angesetzt.

²²⁷ Verfasserin vorliegender Arbeit setzt den Fokus auf die deutsche Literatur, vereinzelt ergänzt durch Versuche aus dem Ausland. Die Versuche an bewehrten Brücken wurden nicht mit aufgenommen mit Ausnahme des Probobogens in Ehingen, da dieser im weiteren Verlauf der Arbeit noch erwähnt wird.

Coignet 1861, Ausstellungsbogen Nantes:

Beschreibung: Probebogen aus „béton aggloméré“ von 5 m Lichtweite für die Ausstellung in Nantes, schiefe Brücke (45°) mit einem Pfeilverhältnis von 1:20 (!) und einer Scheitelstärke von 22 cm.

Quellen: [Coignet 1861, S. 157].

Coignet 1862, „provisorische Brücke“:

Beschreibung: Von Coignet provisorisch errichtete schiefe Brücke (45°) aus „béton aggloméré“ mit einer Lichtweite von 6 m und einem Pfeilverhältnis 1/12, Scheitelstärke 15 cm. Zum Abbruch ist Folgendes bekannt: „Diese Brücke,‘ sagt das obige Blatt [Anm.: l’Union bretonne, 24.03.1862], ‚war in weniger als vier Tagen erbaut worden, und man brauchte sechs oder sieben Tage, um sie abzubringen. Man hatte nacheinander und ohne großen Erfolg die Spitzhacke, die Steinhacke, den Keil, die Brechstange und den Steinhammer versucht. (...) Um endlich die auf den Steinplatten liegenden Theile abzubringen, mußte man mehrere Sprengungen machen.“ [N. N. 1863, S. 242].

Quellen: [N. N. 1863, S. 242].

Probegogen von Souppes, 1864:

Beschreibung: Werksteingewölbe mit Zementmörtel mit einer Lichtweite von 37,9 m (Abbildung 4.29), sehr flach²²⁸ gespannt (Pfeilverhältnis von 1/18). Lagrené beschrieb insbesondere die Auswirkungen infolge von Temperatureinwirkungen sowie dynamischer Belastung.

Quellen: [Féline-Romany 1866]; [Lagrené 1868]; [Köpcke 1877b]; [Brosselin 1878, S. 27–29]; [Séjourné 1913c, S. 375–376].

Hoffmann 1872, Probegogen:

Beschreibung: In einer Fußnote wird ein Probegogen aus Beton beschrieben, der mit 26 mm Stärke, 0,942 m Weite, 78 mm Stich erstellt wurde. Die Probegbelastung erfolgte nach und nach mit 4250 Pfund, der Bogen zeigte keinerlei Durchbiegung. Der Belastungsversuch wurde gestoppt, weil die Zimmerdecke erreicht war und keine weitere Last mehr aufgebracht werden konnte.

Quellen: [Hoffmann 1872a].

Feege & Gotthard 1879, zwei Probegogen:

Beschreibung: In der Portland-Zement-Fabrik von Feege & Gotthard in Offenbach a. M. wurden zwei Bogen mit vier Metern Lichtweite aus Zementbeton hergestellt. Ein Bogen hatte eine Scheitelstärke von 9 cm mit einer Verstärkung gegen die Kämpfer auf 10 cm,

²²⁸ Max Leibbrand definierte: „Man unterscheidet zweckmäßig Flachbrücken mit weniger als 1/8 Pfeil, gedrückte Brücken mit 1/8 bis ¼ und Hochbrücken mit über ¼ Pfeil.“ [Leibbrand 1906b, S. 279].

DER MONOLITHISCHE BOGEN

der andere Bogen erhielt in den Kämpfern eine Stärke von 6,5 cm mit einer Verdickung im Scheitelbereich auf 12 cm. Ausführliche Belastungstests und die Dokumentation der Risse zeigten, dass die Ausnutzung der Druckfestigkeit des Materials meist zu gering sei (1/30 bis 1/50). Der Grund hierfür sei der noch unsichere Umgang mit der Stützlinie, der Druck verteile sich nicht auf den ganzen Querschnitt (vgl. hierzu Kap. 7.1).

Quellen: [Löhr 1879]; [N. N. 1881b, S. 208]; [Stegmann 2015, S. 389].

Feege & Gotthard 1879, Ausstellungsbogen Offenbach:

Beschreibung: Bogen mit einer Lichtweite von 16 m, einem Pfeilverhältnis von 1/7 und einer konstanten Bogenstärke von 28 cm. Dieser Bogen wurde acht Tage nach der Fertigstellung ausgerüstet und senkte sich lediglich um einen Millimeter im Scheitel. Probelastungen fanden zwar statt, jedoch wurde er nicht zum Einsturz gebracht: Er steht bis heute, allerdings mehrfach überarbeitet, im Offenbacher Dreieichpark.

Quellen: [Löhr 1879, S. 361]; [Stegmann 2014, S. 68]; [Stegmann 2015, S. 389].

Dyckerhoff & Widmann 1880, Ausstellungsbrücke Düsseldorf:

Beschreibung: Die Dyckerhoffsche Ausstellungsbrücke zur Gewerbeausstellung in Düsseldorf 1880 wurde komplett aus Zementbeton erstellt. Sie verfügte über einen Bogen mit 12 m Spannweite, 2,25 Pfeilhöhe und 20 cm konstanter Stärke. Der Bogen sowie die Widerlager wurden vor Ort erstellt, sämtliche Ornamente, Treppenstufen usw. vorgefertigt und dann versetzt. Bei einer Probelastung wurde der Bogen zusätzlich zum vorhandenen Gewicht des Pavillons von 38 t mit 3 t belastet, der Scheitel habe dabei „*nicht die geringste Senkung*“ [N. N. 1880a, o. S.] gezeigt. Die gesamte Firmendarstellung auf dieser Ausstellung wurde mit einer Goldmedaille ausgezeichnet. In der Begründung hieß es: „*Hervorragende Ausstellung in dieser Branche, wie noch keine bisher. Fabrikation steht an der Spitze deutscher Cement-Industrie, hat hauptsächlich dazu beigetragen, das Ausland zu verdrängen. Große Aufmerksamkeit u Erfahrung bei Herstellung des Cementes u der Mauern. Brückenkonstruktion von großer Bedeutung.*“ [StadtAD, Sign. 0-1-18].

Quellen: [N. N. 1880a, o. S.]; [N. N. 1880c, S. 168]; [StadtAD, Sign. 0-1-18]; [Stegmann 2014, S. 81–87] u. v. m.

Feege & Gotthard 1880, Ausstellungsbrücke Düsseldorf:

Beschreibung: Auf derselben Ausstellung in Düsseldorf präsentierte die Firma Feege & Gotthard ebenfalls einen Betonbogen (Abbildung 4.30). Dieser war zwar technisch bedeutend, jedoch weniger publikumswirksam: Er sei „*weniger anspruchsvoll in der architektonischen Durchbildung, bietet nichtsdestoweniger dem Ingenieur sowohl in constructiver Hinsicht als auch durch die grössere Spannweite ein noch interessanteres Ausstellungsstück (...) und dürfte sicher geeignet sein, die deutschen Fachkreise, welche sich bis jetzt dem Betonbau gegenüber sehr spröde verhielten, zu häufigerer Anwendung dieser Bauart zu veranlassen.*“ [N. N. 1880a, o. S.]. Neben der Spannweite und dem kühnen Pfeilverhältnis (22 m bei einem Stich von 1,75 m) falle die Verdickung des Bogens im Scheitel auf. Die bei den Probelastungen der beiden 1879 erstellten Gewölbe

beschriebenen Ergebnisse wurden bei dieser Brücke bereits umgesetzt. Die Brücke wurde demnach mit einem bronzenen Staatsdiplom ausgezeichnet, zur Begründung: „*Vortreffliches Material. Eigenartige, kühne Konstruktion einer Cementbrücke, bedeutungsvoll für das Ingenieurwesen.*“ [StadtAD, Sign. 0-1-18]. Die Brücke war im April innerhalb von acht Stunden erbaut worden. Während der Probelastung mit 400 kg/m² sowie über den Ausstellungszeitraum hinweg zeigte sie sich in tadellosem Zustand. Nach starken Regenfällen im Dezember wurde ein Auflagerbereich aufgeweicht, das Nachgeben des Widerlagers führte in der Folge zum Einsturz (vgl. Kap. 6.2.3).

Quellen: [N. N. 1880a, o. S.]; [StadtAD, Sign. 0-1-18]. Zum Versagen: [K. 1881]; [Schwering 1881, S. 538].

Dyckerhoff & Widmann 1880, mehrere Probebogen:

Beschreibung: Engesser beschrieb die von Dyckerhoff & Widmann durchgeführten Versuche in der Deutschen Bauzeitung. Es seien dazu fünf Betonbogen mit einer Spannweite von 3,5 m mit dem gleichen Beton erstellt worden (Abbildung 4.31). Der erste Bogen hatte eine konstante Bogenstärke von 12 cm bei einem Stich von 35 cm; Bogen Nr. 2 verfügte über eine Verdickung im Scheitel (Stärke dort 15 cm, an den Kämpfern 9 cm) bei gleichem Stichmaß; der dritte Bogen wies eine konstante Bogenstärke von 9 cm auf bei einer Pfeilhöhe von 41 cm; der vierte Bogen hatte eine Scheitelstärke von 12 cm bei einem Stichmaß von 24 cm; der letzte Bogen wies eine Scheitelstärke von 9 cm auf, am Kämpfer 15 cm mit einem Stich von 38 cm. Die Gewölbe wurden verschiedenen Probelastungen unterzogen; die Ergebnisse bewiesen die sehr gute Eignung des Beton für Brücken- und Deckengewölbe [Engesser 1881, S. 582].

Quellen: [Engesser 1881]; [Büsing 1892, S. 253–254]; [Stegmann 2014, S. 69–71]; [Stegmann 2015, S. 390].

Lauckhardt/Liebold 1880, Probebogen in Kassel:²²⁹

Beschreibung: Auf dem Gelände des Zementfabrikanten Lauckhardt erstellter Probebogen mit 10 m Lichtweite und 1,25 m Stich (Abbildung 4.32). Der Bogen verfügte über 35 cm Stärke im Scheitel sowie 50 cm im Kämpfer. Liebold schrieb, dass dieser Bogen gebaut wurde, um die dortigen Techniker mit der Betonbauweise bekanntzumachen. Den Probelastungen wohnten dann auch mehrere Baubeamte, Architekten und Ingenieure aus Kassel bei [Liebold 1882, S. 34]. Die Resultate waren dermaßen überzeugend, dass eine in Eisen geplante Brücke über die Beise in Beiseförth mit 7,5 m Lichtweite mit einer Kosteneinsparung von 30 % in Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise ausgeführt wurde [N. N. 1881b, S. 208].

Quellen: [N. N. 1881b]; [Liebold 1882, S. 34–35].

²²⁹ Die Brücke wurde wohl von Lauckhardt und auch mit seinem Zement erstellt, dennoch nennt Liebold sie unter den von der Vorwohler Fabrik ausgeführten Bauten [Liebold 1882, S. 34–35]. Vermutlich war Liebold beteiligt, um die Bauweise bekannter zu machen (vgl. Kap. 4.5).

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Liebold 1880,²³⁰ Ausstellungsbrücke Magdeburg:

Beschreibung: Für die landwirtschaftliche Ausstellung 1880 in Magdeburg wurde mit Bruchstein und Vorwohler Portland-Zement eine Brücke mit 13,8 m Lichtweite, 2,475 m Stich und 38 cm Stärke im Scheitel erstellt (Abbildung 4.33). Liebold berichtete, die Probelastungen haben ein günstiges Resultat ergeben und die Elastizität des Materials nachgewiesen [Liebold 1882, S. 41]. Die Ausstellungsbrücke wurde von E. H. Hoffmann in scharfem Ton beschrieben: Die Brücke, die „(...) trotz eines mehrfach den Mangel an gehöriger Einsicht und Ueberlegung bekundenden Entwurfes, das seit Jahrhunderten mit allerlei oft seltsamen Mitteln erstrebte Ziel als erreicht nachweist, daß nämlich bei und nach erfolgter Ausrüstung nicht die mindeste Veränderung des Mauerwerks, nicht der geringste Riß wahrnehmbar geworden ist. (...) Somit ist das einfache, anspruchlose Bauwerk gewiß höchst beachtenswert.“ [Hoffmann 1880, S. 310].

Quellen: [Liebold 1882, S. 41]; [Hoffmann 1880, S. 310].

Liebold 1881, Ausstellungsbrücke Breslau:

Beschreibung: Über diese Brücke konnten keine vertiefenden Informationen ausfindig gemacht werden, sie wird jedoch in Liebolds Briefkopf mit der Magdeburger Brücke als Referenz genannt: „2 Probe-Brücken in Magdeburg und Breslau mit der silbernen Staatsmedaille ausgezeichnet 1880/81“ [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].

Quellen: [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].

Stuttgarter Immobilien-Baugeschäft 1881, Ausstellungsbrücke Stuttgart:

Beschreibung: Für die Landesgewerbeausstellung in Stuttgart 1881 erstellte Brücke mit 6,2 m Spannweite und 1/10 Stich. Die Bogenstärke betrug am Scheitel 10 cm, am Kämpfer 25 cm. Das Mischungsverhältnis des Betons sank von 1:1:2 (Zement:Sand:Kies) im Scheitel auf 1:5 (Zement:Sand + Kies) in den Kämpfern bis hin zu 1:10 in den Widerlagern [Schwering, Schlierholz 1881, S. 538].

Quellen: [Schwering, Schlierholz 1881, S. 538]; [n. 1881, S. 298].

Dorn 1881, Ausstellungsbrücke Stuttgart:

Beschreibung: Ebenfalls für die Landesgewerbeausstellung in Stuttgart 1881 erstellte Brücke mit 10 m Spannweite und 1/10 Stich. Am Scheitel mit einer Bogenstärke von 20 cm, am Kämpfer 30 cm. Nach Ausstellungsende sollten beide Brücken – die vorgenannte und die hier beschriebene – Belastungsproben bis zum Versagen unterzogen werden. Eine Dokumentation dieser Belastungsproben ist nicht bekannt.

Quellen: [Schwering, Schlierholz 1881, S. 538].

²³⁰ Die Bauarbeiten wurden wohl von einem örtlichen Maurer übernommen, trotzdem nennt Liebold diese Ausstellungsbrücke in seinem Briefkopf als Referenz [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].

Vigier 1883, Ausstellungsbrücke Zürich:

Beschreibung: Auf der Schweizerischen Landesausstellung 1883 in Zürich wurden mehrere Betonobjekte ausgestellt, darunter ein Bogen, der im Scheitel offen gelassen wurde, ein einseitig schwebender Portikus, der allerdings mehrfach versagte und letztlich untermauert wurde sowie eine Betonbrücke (Abbildung 4.34). Diese wurde aus Platzgründen lediglich mit 6 m Lichtweite ausgeführt. Nach der Beendigung der Ausstellung erfolgte eine Bruchbelastung dieses Bauwerks. Diese Versuche fielen erfolgreich aus, wenngleich die unsorgfältige Ausführung des Bogens, die mit der kurzen Lebensdauer desselben begründet wurde, die Ergebnisse sicherlich beeinflusste. Insgesamt resümierte Tetmajer jedoch, dass die Form, Lage und Stellung der Bruchflächen für die Bogenwirkung der Konstruktion sprechen und die Stützlinie daher zur Formgebung und Dimensionierung das geeignete Mittel sei. Des Weiteren sei der Beton für Gewölbebauten vorzüglich geeignet; die einzelnen Risse haben sich wie Gewölbefugen verhalten und stellen keine Einsturzgefahr dar. Insgesamt sei das Verhalten dem der steinernen Brücken ähnlich [Tetmajer 1883, S. 130].

Quellen: [Tetmajer 1883].

Zementfabrik Blaubeuren 1884, Ausstellungsbrücke Augsburg:

Beschreibung: Eine auf einer Augsburger Ausstellung 1884 erbaute Brücke aus Zementbeton wies 25 m Lichtweite auf, 3 m Pfeilhöhe und damit ein Pfeilverhältnis von 1/8,3. Der Bogen hatte im Scheitel lediglich eine Stärke von 15 cm, im Kämpfer 30 cm. Ein Beobachter nannte das Bauwerk „Musterstückchen“, jedoch: „Eine Aufschrift verbietet das Betreten des kühnen Bogens, was den Werth der Schaustellung allerdings etwas beeinträchtigt.“ [N. N. 1886a].

Quellen: [N. N. 1886a].

Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein 1890–1895, mehrere Probegewölbe:

Beschreibung: Im Jahre 1890 bemängelte Joseph Melan den Umgang mit der Gewölbeberechnung: „Wenn es auch nach unserer jetzigen Kenntniss von den Eigenschaften der Steine und des Mörtels feststeht, dass die statischen Untersuchungen über Gewölbe auf die Theorie des elastischen Bogens zu gründen sind, so sind wir doch noch weit davon entfernt, eine für die Lösung grosser Aufgaben des Gewölbebaues ausreichende und durch Versuche in grösserem Umfange erprobte Gewölbetaheorie zu besitzen. Man hat sich bisher damit begnügt, die Stärken der Gewölbe vorwiegend nach Schätzungsregeln zu bestimmen. Ueber den damit erreichten Sicherheitsgrad sind wir aber ziemlich im unklaren geblieben, denn auch die fortgeschrittene Theorie kann hierüber aus Mangel an genügenden Erfahrungen keinen verlässlichen Aufschluss geben. Wirkliche Bruchversuche mit Gewölben zu dem Zwecke, um Anhaltspunkte für die zulässige Inanspruchnahme in den Gewölbeconstructions zu gewinnen, sind aber bisher nur äusserst selten angestellt worden.“ [Melan 1890b, S. 449]. Für Fachkreise seien die im Folgenden beschriebenen Testreihen daher von großem Interesse [Melan 1890b, S. 449].

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Die vom Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein in den Jahren 1890–1895 durchgeführten, groß angelegten Versuche an verschiedenen Gewölben diverser Bauarten sind sicherlich als die wichtigsten ihrer Art zu werten.²³¹ Zahlreiche Berichte bereits während der Experimente²³² sowie eine weitreichende Wahrnehmung der Ergebnisse²³³ zeigen die Bedeutung dieser Versuchsreihe. Die Versuche umfassten Experimente an kleineren Hochbau- und Brückengewölben sowie an großen Gewölben mit 23 m Lichtweite, alle wurden im ausführlichen Bericht des Gewölbe-Ausschusses abgehandelt [Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein 1895].

Bei den großen Prohebogen kamen fünf gleich große Gewölbe zur Ausführung: je eines aus Bruchstein- und aus Ziegelmauerwerk, aus Stampfbeton, im Moniersystem sowie eine eiserne Bogenbrücke. Alle wiesen bei einer Lichtweite von 23 m eine Pfeilhöhe von 4,6 m auf, also ein Pfeilverhältnis von 1/5 [Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein 1895, S. 1]. Ziel war die Maximierung der Vergleichbarkeit der verschiedenen Materialien. Das Stampfbetongewölbe erhielt eine konstante Stärke von 70 cm, in den Kämpfern wurden Asphaltplatten eingelegt (Abbildung 4.35; Abbildung 4.36).²³⁴ Aus den Versuchen konnten sowohl Ergebnisse und Empfehlungen für die Berechnung wie auch für die Ausführung von Gewölben gewonnen werden.

Quellen: vgl. insbesondere [Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein 1895]; weiter auch [Melan 1890b]; [L. 1895]; [Emperger 1908b, S. 329–386]; [H. 1896]; [Cecerle 1896]; [Emperger 1932, S. 126–128]; u. v. m.

North's Portland Cement Works Co. 1894, Ausstellungsbrücke Antwerpen:

Beschreibung: Eine Betonbrücke wurde für die Antwerpener Ausstellung erstellt (Abbildung 4.37). Sie verfügte auf dem Niveau der unterquerenden Straße über eine Lichtweite von 60 ft.

Quellen: [N. N. 1894a].

Stuttgarter Zementfabrik Blaubeuren 1896, Prohebogen in Ehingen a. d. D.:

Beschreibung: Im Sommer 1896 erstellter Prohebogen aus Zementbeton mit Eiseneinlagen aus I-Trägern. Bis ins Jahr 1899 wurden Messungen angestellt bezüglich des

²³¹ Vgl. beispielsweise die Aussagen von v. Leibbrand und Cecerle: „Seit der Untersuchung des bekannten Versuchsbogens von Souppes (...) haben Gewölbproben in grossem Masstab unter gleichzeitiger wissenschaftlicher Beobachtung und Verwertung der hierbei gemachten Beobachtungen nicht mehr stattgefunden.“ [Leibbrand 1897b, S. 13]. Der Österreichische Ingenieur- und Architektenverein hat „Versuche über das Verhalten und die Tragfähigkeit gewölbter Brücken gemacht, die zu den grossartigsten und, man kann es wohl ohne Widerspruch behaupten, gelungensten ähnlicher Art gehören.“ [Cecerle 1896, S. 605]. Weyrauch bezeichnete die Versuchsreihe als verdienstvoll [Weyrauch 1897, S. 99].

²³² Z. B. [Melan 1890b]; [Gaertner 1892]; [Prenninger 1892]; [Gaertner 1893] u. a.

²³³ Vgl. die Quellenangaben zu diesen Versuchen sowie Fußnote 232. Ausführliche Betrachtungen mit eigenen Berechnungen im Bezug auf die Gewölbeversuche in [Weyrauch 1897].

²³⁴ Vgl. Fußnote 619 im Kap. 7.5.2.

Verhaltens bei Be- und Entlastungen sowie Temperaturänderungen bis zum letztlichen Versagen des Bogens (Abbildung 4.38 und Abbildung 4.39).²³⁵

Quellen: [Hoch 1904]; [Emperger 1932, S. 127–130].

Dyckerhoff & Widmann 1902, Ausstellungsbrücke Düsseldorf:

Beschreibung: Das ein Wasserbecken überspannende Bauwerk hatte einen Dreigelenkbogen²³⁶ von etwa 30 m Licht- und 28 m Spannweite. Die leicht schiefe Brücke wies lediglich 2 m Pfeilhöhe auf, so dass das Pfeilverhältnis 1/14²³⁷ betrug (Abbildung 4.40 und Abbildung 4.41). Der Bogen wies eine Stärke von 0,65 m im Scheitel, 0,7 m in den Kämpfern und 0,85 m an der stärksten Stelle auf. Eine Probelastung zeigte eine Scheitelsenkung von lediglich 1,2 mm.

War anfangs der dauerhafte Erhalt der Brücke geplant und diese demnach auch für schweren Lastverkehr ausgelegt, so forderte im Jahre 1908 die Stadt Düsseldorf den Rückbau, um das Gelände anderweitig nutzen zu können. Dies bot die seltene Gelegenheit, ein „reales“ Bauwerk bis zum Bruch zu belasten. Im Herbst 1908 fanden die Versuche statt, denen eine Reihe hochrangiger Vertreter aus Wissenschaft wie auch staatlicher Einrichtungen beiwohnten.²³⁸

Für die Durchführung war der Bogen freigelegt, also der Überbau entfernt worden (Abbildung 4.42). Zusätzlich wurden Gerüste aufgestellt: Ein Lehrgerüst, das den Bogen nach dem Versagen stützen sollte sowie mehrere Laufstege, die eine genaue Beobachtung von Rissen und Messgeräten erlaubten. Die Belastung wurde derart vorgenommen, dass Eisen einseitig an der ungünstigsten Stelle des Bogens konzentriert aufgebracht wurde (Abbildung 4.42). Eine Erhöhung der Last weit über das geplante Maß²³⁹ hinaus verursachte zwar Risse, jedoch keinen Einsturz. Der Versuch wurde letztlich abgebrochen, weil der Aufwand für ein neues, stärkeres Gerüst zu hoch war und weitere wissenschaftliche Erkenntnisse nicht erwartet wurden.

Die Schlüsse aus diesem Versuch betrafen insbesondere das Verformungsverhalten der Bogenschenkel sowie die Eignung der Gelenke unter dieser Extrembelastung. Durch die Belastung entstanden im Bogen große Biegungs- und Scherbeanspruchungen. Die verzerrt dargestellten Messergebnisse der Verformungen im Bogen sowie der Verdrehungen in den Gelenken für verschiedene Laststufen zeigt die Abbildung 4.43, die zugehörigen Stützlinien sind Abbildung 4.44 zu entnehmen. Die Belastung verursachte eine Scheitelsenkung, eine Abflachung des belasteten Gewölbeschenkels sowie eine stärker

²³⁵ Vgl. Fußnote 472.

²³⁶ Vgl. hierzu Kap. 7.

²³⁷ Teilweise wird das Pfeilverhältnis auch mit 1/14,6 angegeben [z. B. Deutscher Beton-Verein 1908, S. 5]. Im Plan ist jedoch die Stützweite mit 28,022 m vermaßt, die Höhe zwischen Kämpfer- und Scheitelgelenk mit 2,0 m.

²³⁸ „man kann sagen, daß nur wenige Männer von hervorragendem Rufe auf dem Gebiete des Betonbaus bei der Belastung nicht zugegen waren.“ [Deutscher Beton-Verein 1908, S. 1].

²³⁹ Letztlich entsprach das aufgebrachte Gewicht demjenigen von 18 schweren Dampfstraßenwalzen, welches auf eine Fläche von 5 mal 8 m aufgebracht wurde [Deutscher Beton-Verein 1908, S. 6].

werdende Krümmung der unbelasteten Bogenhälfte. Im dritten Teil der Abbildung 4.43 ist der Zustand nach der Bildung des ersten Hauptrisses zu erkennen: Während sich vorher der Scheitel senkte, führt die Rissbildung zu einer deutlichen Hebung desselben sowie zu einer Verringerung der Krümmung der unbelasteten Seite [Deutscher Beton-Verein 1908, S. 7].

Als Schlussfolgerungen werden in dem Abschlussbericht folgende genannt: Die vorhandene Druckfestigkeit des Materials betrug mehr als das Fünffache des Rechenwerts. Es konnte eine Zugfestigkeit des Materials von 25 kg/qcm nachgewiesen werden. Da diese in der Berechnung nicht berücksichtigt wird, erhöht sie den Sicherheitsfaktor noch weiter. Die aufgebrachte Last war um ein Mehrfaches höher als eine unter üblichen Randbedingungen überhaupt erreichbare, zusätzlich fehlte die lastverteilende Wirkung des Überbaus. Die Gelenke bewährten sich in jeder Hinsicht.²⁴⁰ Insgesamt verlief die Probelastung der Düsseldorfer Ausstellungsbrücke zur vollen Zufriedenheit aller Beteiligten; das Gesamturteil war geradezu enthusiastisch.²⁴¹

Quellen: Beschreibung der Brücke: [Fr. E. 1902b, ab S. 423]; [Verein Deutscher Portland-Zement-Fabrikanten, Deutscher Beton-Verein 1902]; [Büsing 1905, S. 472–473]. Zu den Belastungsversuchen insbesondere: [Deutscher Beton-Verein 1908]; weiterhin auch [K. 1909]; [Weese, Gehler 1909]; [Büsing 1912, S. 621–623]; [Emperger 1932, S. 130–137].

4.5 Bernhard Liebold und seine frühen Betonbogenbrücken

Einer der bedeutendsten deutschen Vertreter des Betonbrückenbaus um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert war Bernhard Liebold. Beginnend in den 1870er Jahren baute er bis zum Ersten Weltkrieg annähernd 1.000 Brückenbauwerke, außerdem zahlreiche andere Ingenieurbauten wie Talsperren, Kanäle, Wasserbehälter und vieles mehr [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].

1843 geboren, erlernte Liebold als junger Mann das Zimmermannshandwerk, bevor er ab 1861 an der Baugewerkeschule in Holzminden eingeschrieben war.²⁴² Wenige Jahre später begann er dort seine Tätigkeit als Lehrer, zahlreiche Publikationen zu verschiedenen Themen folgten. Anfang der 1870er Jahre wurde er von Godhard Prüssing und Friedrich Planck angeworben, die in Vorwohle, nahe Holzminden, geplante Zementfabrik zu projektieren [Seeliger 2004, S. 49].

²⁴⁰ Vgl. „Unleugbar hat sich hier infolge (...) der Schlaueit des Materials das Gewölbe dank der Wirkung der Gelenke im kritischsten Momente einen neuen Gleichgewichtszustand geschaffen, um weiter standfest bleiben zu können.“ [Deutscher Beton-Verein 1908, S. 12].

²⁴¹ Der Direktor des Deutschen Beton-Vereins, Regierungsbaumeister Weese, äußerte sich nach den Versuchen: „es hat somit die Brücke eine (...) 18 1/2fache Nutzlast getragen, ohne zusammenzubrechen, obwohl die Aufbetonierung, welche die Widerstandsfähigkeit noch wesentlich erhöht hätte, entfernt worden war. Mit Staunen war von allen Zuschauern die immer wachsende Eisenmenge betrachtet worden, die der Brücke auf den Rücken gepackt wurde; noch eine Wagenladung, hieß es immer, und sie muß brechen; aber der Beton erwies sich widerstandsfähiger, als seine wärmsten Verehrer glaubten. Mit großem Stolze darf daher die Betonbauindustrie auf diese Probelastung hinweisen und darf hoffen, das Vertrauen für ihre Bauweise in weiten Kreisen gestärkt und neue Freunde gewonnen zu haben.“ [Deutscher Beton-Verein 1908, S. 4].

²⁴² Ausführlicher in [Seeliger 2004]: Seeliger stellt hier die persönliche sowie die Firmengeschichte und einige der Frühwerke Liebolds dar. Vgl. auch [Liebold 1992/93].

Während viele deutsche Techniker zu Anfang der 1870er Jahre dem Bauen mit Beton noch sehr misstrauisch entgegenstanden,²⁴³ begann die Produktion in der „Vorwohler Portland-Zementfabrik Prüssing, Planck & Co.“ zu Beginn des Jahres 1873. Der Verkauf lief zunächst mäßig, die Handelskammer Braunschweig schrieb über den Umsatz der Vorwohler Fabrik im Jahr 1874 vom „schlankeste[n, Erg. d. Verf.] Absatz für das Fabrikat und zwar hauptsächlich in Sachsen, Thüringen und Hessen, während der Absatz im Herzogthum Braunschweig verhältnissmäßig sehr schwach war.“ [N. N. 1875, S. 15]. Die Verbesserung des Absatzmarktes hatte oberste Priorität, sollte die Zementfabrik zu wirtschaftlichem Erfolg kommen. Um den Beton im Bauwesen zu etablieren, lassen sich mehrere Strategien insbesondere von Bernhard Liebold selbst herausarbeiten: die Gründung eines Baugeschäftes, die Werbung, die Vermittlung eigener Kenntnisse über den Betonbau und die Erschließung neuer Anwendungsbereiche für den Zement, wobei die Übergänge teilweise fließend sind.²⁴⁴ Im Folgenden werden diese Stichworte erläutert.

Bereits im Jahr 1873, also noch in demselben Jahr, in dem die Produktion in der Zementfabrik anging, gründeten deren Eigentümer gemeinsam mit Bernhard Liebold ein Bauunternehmen, die „Vorwohler Zement-Baugesellschaft Prüssing, Planck & Co.“ [Seeliger 2004, S. 49].²⁴⁵ Die Gründung des Baugeschäfts erfolgte „zu dem besonderen Zweck, den in dem Werk Vorwohle erzeugten Zement zu verwerten“ [Liebold 1992/93, S. 50].²⁴⁶ In den ersten Jahren wurden diverse Projekte, vornehmlich in Holzminden und Umgebung, verwirklicht, darunter diverse Bauwerke für den eigenen Bedarf.²⁴⁷ Hierunter fallen auch die in Kap. 3.2.3 bereits beschriebenen Arbeiterhäuser in Vorwohle²⁴⁸ sowie die Villa²⁴⁹ des Geschäftspartners Friedrich Planck: Liebold sowie seine Partner bauten auch mit dem

²⁴³ Vgl. Kap. 3.2.3.

²⁴⁴ Eine ganz ähnliche Entwicklung zeigt Stegmann in [Stegmann 2014, S. 64–118] für die Firma Dyckerhoff & Widmann auf. Für die Etablierung des Baustoffes Beton seien insbesondere Forschung und Entwicklung, Werbung und Öffentlichkeitsarbeit (Firmenschriften, Publikationen, Verbandstätigkeiten, Teilnahme an Ausstellungen) sowie die Entwicklung neuer Einsatzbereiche für den Zement entscheidend gewesen.

²⁴⁵ Das Unternehmen wurde 1882 in „Vorwohler Zementbaugesellschaft B. Liebold & Co.“ umbenannt, 1886 wurde daraus die „B. Liebold & Co. KG“, im Jahr 1900 folgte die Umwandlung in eine AG [Seeliger 2004, S. 49]. Eine ausführliche Darstellung der Firmengeschichte findet sich in dem Aufsatz [Liebold 1992/93]. Der Text wurde 1950 vom Neffen Bernhard Liebolds, Max Liebold, verfasst. Dieser war in der Firma seines Onkels seit 1914 Mitglied der Geschäftsführung.

²⁴⁶ Vgl. z. B. auch [Liebold 1882, S. 10]: Nur mit strenger Kontrolle der Arbeiter sei ein tadelloses Betonbauteil herzustellen. „Dieser Umstand verhindert zunächst noch eine allgemeinere Einführung der Bauweise und veranlasste (...) die Vorwohler Zementfabrik zur Bildung einer besonderen Bautengesellschaft, welche unter der Firma B. Liebold & Co. in Holzminden ihren Sitz hat.“ Des Weiteren in [Liebold 1877d, S. 458]: „Ein Haupterforderniss für gute Grobmörtelbauten besteht (...) in der sachgemässen Verarbeitung derselben (...). Dies ist ein Uebelstand für die Ausbreitung der Zement-Verwendung und die Benutzung des Grobmörtelbaues; derselbe lässt sich aber beseitigen, wenn Spezialisten die Verarbeitung des Zementes übernehmen oder wenn die Zementfabriken, in deren Interesse ein vermehrter Konsum liegt, die Ausführung von Zementarbeiten durch eigene geübte Arbeiter bewerkstelligen lassen für deren Arbeiten sie Garantie leisten.“

²⁴⁷ Die Übernahme von Bauaufgaben durch Fabrikanten wurde nicht durchweg positiv gesehen. Dazu Dr. Hugo Delbrück, erster Vorsitzender des Vereins Deutscher Portlandzement-Fabrikanten: „Führen die Cementfabrikanten erst einmal die Betonarbeiten aus, so wird es auch bald dahin kommen, daß (...) die Fabrikanten zugleich auch die Bauunternehmer werden. Wohin eine solche Konzentrirung der Arbeit führt, ist leicht zu ersehen; die wirklichen Fachleute werden nämlich dann allenfalls noch in dem Dienst der Fabrikanten stehen.“ [Delbrück 1882, S. 127–128]. Er ruft sogar dazu auf, den Zement nur von Fabriken zu beziehen, die sich dessen Anwendung nicht zur Hauptaufgabe gemacht haben.

²⁴⁸ Vgl. [Liebold 1875, S. 48].

²⁴⁹ Vgl. dazu [Liebold 1877d].

Ziel, die Eignung des Baustoffes Beton nachzuweisen sowie Erfahrungen in dessen Anwendung zu gewinnen. Beabsichtigt wurde vornehmlich die Verbesserung der Bauweise sowie ein sicherer Umgang bei der Dimensionierung von Bauteilen.²⁵⁰

Unter dem Überbegriff der Werbung sind vor allem die auffällig gehäuft auftretenden Publikationen von Bernhard Liebold in den Anfangsjahren von Fabrik und Baugeschäft zu nennen. Bereits im Jahr nach dem Produktionsbeginn der Zementfabrik und der Gründung des Baugeschäftes schreibt er seine Monographie mit dem Titel *„Der Zement in seiner Verwendung im Hochbau und der Bau mit Zement-Béton zur Herstellung feuersicherer, gesunder und billiger Gebäude aller Art.“* [Liebold 1875].²⁵¹ Darin berichtet er von den bisher ausgeführten fremden sowie selbst erstellten Hochbauten aus Beton und geht auf die gegenüber der beschriebenen Bauart herrschenden Vorurteile ein. Dabei hoffe er, einen Nachweis liefern zu können, *„dass die Zementverwendung eine hervorragende Stellung in unserem modernen Hochbauwesen einzunehmen berechtigt ist.“* [Liebold 1875, S. XII]. Auch in den Folgejahren sind in den einschlägigen Bau-Fachzeitschriften zahlreiche, teilweise mehrteilige umfassende Publikationen von Bernhard Liebold zu finden.²⁵² Dabei ist ein Grundtenor sämtlicher Artikel, die Vorurteile gegen den Beton bzw. Zement auszuräumen und die Vorteile der Bauweise in den Mittelpunkt zu stellen.²⁵³ Wenngleich Liebold in seinen Artikeln zumeist ausgeführte Betonbauten beschreibt oder vermeintlich allgemein die Bauweise erläutert, so nutzt er immer wieder die Gelegenheit, die Vorwohler Portland-Zementfabrik zumindest zu nennen, teilweise sogar deren Produkte anzupreisen.²⁵⁴ Auffällig ist auch, dass er stets den Namen der Zementfabrik, nicht jedoch den des Baugeschäfts nennt – auch das ist ein Hinweis darauf, dass es um die Verbesserung des Zementabsatzes ging. In [Seeliger 2004, S. 47] wird berichtet, dass es ca. acht Jahre dauerte, bis sich der Betrieb als rentabel gestaltete, also bis ca. 1880/81. Aus der Zeit danach sind nur noch vereinzelt Publikationen bekannt, wie etwa [Liebold o. J. (ca. 1892)]. Aus Liebolds späteren Jahren ist aus der Fachliteratur lediglich noch der Artikel über die Illerbrücke in Lautrach zu nennen [L. (Liebold) 1904].²⁵⁵

Auch in den Bereich der Werbung fallen Teilnahmen und Firmenpräsentationen auf Ausstellungen. Im Falle von Liebold ist der Bau zweier Probebrücken für Ausstellungen in Magdeburg und Breslau in den Jahren 1880/81 bekannt.²⁵⁶ Beide wurden auf dem

²⁵⁰ Im Vorwort zu [Liebold 1875, S. VII] steht zu lesen: „Selbstverständlich ist es (...) wesentlich, dass man sich durch Versuche nach allen Richtungen hin über das Verhalten der daraus herzustellenden Konstruktionen, deren Stärke, zulässige Inanspruchnahme usw. informirt, und die gemachten Missgriffe auf ihre Ursachen zurückführt. Auch der Verfasser hat bei seinen Bétonbauten diesen Weg einschlagen müssen, und wenn ihm auch Anfangs nicht alle Konstruktionen gelungen sind, so hat er durch seine Versuche Anhaltspunkte gewonnen, welche für die Art der Ausführung und für die Bestimmung der Wand- und Gewölbestärken als Richtschnur dienen können.“

²⁵¹ Das Vorwort ist datiert mit November 1874 [Liebold 1875, S. XIII], der Druck und die Veröffentlichung erfolgten dann 1875.

²⁵² Vgl. beispielsweise [Liebold 1877a]; [Liebold 1877b]; [Liebold 1877c]; [Liebold 1877d]; [Liebold 1878a]; [Liebold 1878b]; [Liebold 1880]; [Liebold 1882]; [Liebold 1883].

²⁵³ Vgl. insbesondere [Liebold 1880], was sich mehr wie eine Werbeschrift denn einen Fachartikel liest.

²⁵⁴ Vgl. [Liebold 1880, S. 36]: Unter den Zementen stehe „die Vorwohler Portland-Cementfabrik oben an“.

²⁵⁵ Vgl. Kap. 8.4; Firmenschriften erschienen auch nach der Jahrhundertwende noch.

²⁵⁶ Vgl. Kap. 4.4.

Firmenbriefkopf genannt unter dem Zusatz „mit der silbernen Staatsmedaille ausgezeichnet“ [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13]. Von späteren Ausstellungsteilnahmen ist im Falle von Bernhard Liebold nichts bekannt. Auch hier steht zu vermuten, dass mit dem Eintreten des wirtschaftlichen Erfolges der Zementfabrik der hohe Aufwand für solche Repräsentations- und Werbezwecke nicht mehr notwendig war.

Unter dem Stichwort der „Wissensvermittlung“ sind mehrere Aussagen zu werten, die feststellen lassen, dass Liebold seine Kenntnisse zum Betonbau bereitwillig weitergab. Es ging ihm nicht in erster Linie darum, seine Erfahrungen für sich zu behalten und ein Monopol als Bauunternehmer zu schaffen. So schreibt er beispielsweise im Vorwort zu seiner Monographie 1875: *„Wenn er seine Erfahrungen hiermit ohne Rückhalt veröffentlicht, so thut er dies in der Absicht, dass bei Versuchen an anderen Orten Missgriffe vermieden und gleich Anfangs solide Konstruktion für die Zementbauten erreicht werden können.“* [Liebold 1875, S. VII]. Viel wichtiger war ihm der Umsatz der Zementfabrik: Dafür gab er seine Erfahrungen weiter mit der Absicht, den Verkauf des Vorwohler Zements zu erhöhen. Ein Beispiel dafür ist auch der von Liebold beschriebene Bau eines Probefogens in Kassel,²⁵⁷ *„welcher den Zweck verfolgte, die dortigen Techniker mit der Baumethode bekannt zu machen und ihnen durch Probelastungen zu zeigen, welche bedeutenden Spannungen derselbe auszuhalten imstande sei.“* [Liebold 1882, S. 34]. Bei den Probelastungen seien verschiedene Kasseler Baubeamte, Architekten und Ingenieure anwesend gewesen. In seinem Artikel in der Zeitschrift für Bauhandwerker im Jahr 1882 bemerkt er zum Schluss, dass sowohl seitens der Zementfabrik wie auch von ihm selbst *„jede weitere bezügliche Auskunft bereitwilligst erteilt“* werde [Liebold 1882, S. 53].

Eine weitere äußerst wichtige Strategie für die Zementvermarktung war die Erschließung neuer Einsatzgebiete. Im Falle von Liebold wird dies besonders deutlich am Beispiel der Stampfbetonbrücken: Liebold hatte in seinen Wohnhäusern bereits Erfahrung im Bau von Gewölben aus Beton gesammelt. Um den Baustoff auch im Brückenbau anzuwenden, baute er im Jahr 1877²⁵⁸ ein Probefogwerk²⁵⁹ *„im Auftrage und auf Rechnung der Vorwohler-Portland-Zementfabrik“* [Liebold 1877a, S. 259]. Diese Probefogbrücke ist bis heute erhalten [Veihelmann, Holzer 2013, Abbildung 4.45].²⁶⁰ Sie befindet sich zwischen Vorwohle und Eschershausen im Landkreis Holzminden in Niedersachsen. Das von Liebold als *„Strassenbrücke“* bezeichnete Bauwerk führt einen heute weitgehend aufgegebenen Feldweg über das Flüsschen Lenne und verfügt über eine lichte Weite von 7 m bei einer Pfeilhöhe von 1 m [Liebold 1877a, S. 259].²⁶¹ Die Bogenstärke beträgt im Scheitel 33–35

²⁵⁷ Vgl. auch Kap. 4.4.

²⁵⁸ Mehrfach, z. B. auch auf dem Firmenbriefkopf wird die Brücke mit Baujahr 1876 angegeben [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13], in der Deutschen Bauzeitung 1877 mit *„in diesem Jahre“* [Liebold 1877a, S. 259]. Das genaue Datum konnte nicht verifiziert werden.

²⁵⁹ In [Liebold 1877b, S. 777] schreibt Liebold zur Einführung von Betonbrücken: *„Durch bloße Auseinandersetzungen lassen sich freilich einmal vorhandene Vorurtheile nicht beseitigen, dies hat auch die mehrgenannte Firma bei ihrem Bestreben, die Bruchsteinbrücken einzuführen, wiederholt erfahren müssen, und sie hat sich deshalb veranlaßt gesehen, durch Herstellung von Probefogbauten denselben entgegenzutreten, und durch den Nachweis ihrer Festigkeit dieselben zu entkräften.“*

²⁶⁰ Vgl. auch [Veihelmann, Holzer 2014]; Beschreibung im Katalog unter D7.

²⁶¹ Die von Liebold genannten Abmessungen konnten durch ein tachymetrisches Aufmaß des Bauwerks durch die Verfasserin im Frühjahr 2013 bestätigt werden.

cm, diese nimmt zu den Kämpfern hin auf 53–55 cm zu. Das Tragwerk der Brücke, also der Bogen, ist bis heute nahezu unversehrt erhalten. Die gemauerten Bogenzwickel und Brüstungen der Brücke fehlen dagegen weitgehend.

Zur Ausführung schrieb Liebold, die Breite der Widerlager sei mit 2,55 m berechnet worden. Der Bogen sei unterseitig mit der Konstruktionsmethode mit drei Mittelpunkten geplant worden, beidseitig sei der Bogen bis zum Fundament fortgeführt worden (Abbildung 4.46). Die Verwendung dieser verlorenen Widerlager²⁶² habe er aus Gründen der Material- und damit Kostenersparnis gewählt [Liebold 1877a, S. 259].

Die Herstellung des Bogentragwerks erfolgte in Abschnitten von ca. 1 m Breite sowie in zwei Schichten: Die untere Schicht wurde erstellt, indem zunächst eine etwa 15 cm dicke Schicht Mörtel ausgebreitet wurde, in die Kalksteinplatten mit 15–25 cm Länge radial eingedrückt wurden [Liebold 1877a, S. 259]. Spuren davon sind an wenigen Stellen heute noch sichtbar (Abbildung 4.47). Die zweite Schicht wurde, vermutlich nass in nass,²⁶³ mit einer fertigen Mischung aus Mörtel und kleineren Zuschlägen ausgeführt. Dieses Bauwerk zeigte schon recht deutlich die Prinzipien der Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise, deren Hauptprotagonist Liebold in der Folge werden wird. In späteren Jahren wurde von dieser Bauweise oft als Bruchstein-Zementmörtelbauweise nach System Liebold gesprochen.²⁶⁴

Am Bogen sind bis heute deutliche Spuren der Herstellung sichtbar: Der Intrados weist eine glatte Oberfläche mit sichtbaren Schalbrettandrücken auf, die mit einem unregelmäßigen Netzmuster überzogen ist (Abbildung 4.48 sowie Abbildung 4.49). Diese Optik rührt von der Herstellungstechnik: Auf die Schalung wurde ein Makulaturpapier gelegt, um das Durchfließen des Mörtelwassers zu verhindern.²⁶⁵ Dadurch erreichte Liebold auch, dass sich das Mörtelwasser wie eine Art Putz an der Oberfläche ansetzte, was heute die glatte Untersicht begründet [Liebold 1877a, S. 259].

8 Tage nach Vollendung des Bauwerks wurde ausgerüstet, wenig später wurde es für den Verkehr freigegeben. Weder beim Ausrüsten noch danach haben sich Risse gezeigt. Auch was die Kosten anbetraf, war Liebold zufrieden: *„Eine in gewöhnlicher Weise ausgeführte massive Brücke würde kaum für den 2–3fachen Betrag der Baukosten, welche die Betonbrücke verursacht hat, herzustellen gewesen sein.“* [Liebold 1877a, S. 259]. Sein Fazit war also durchweg positiv: Er glaube, dass die Vorteile des Betonbaus auch für den Brückenbau in größerem Umfange genutzt werden können [Liebold 1877a, S. 259]. In der

²⁶² Standwiderlager bestehen aus einem Mauer- bzw. Betonkörper, gegen den sich der Bogen stützt. Dieser wird auf Biegung beansprucht, weshalb mehr Material notwendig ist. Verlorene (auch unterdrückte oder Druck-) Widerlager reichen als Verlängerung des Bogens tief in den Untergrund. Sie werden auf Druck beansprucht. Diese Art der Widerlagerausführung verspricht den geringsten Materialverbrauch. Die scheinbaren (auch blinde oder verkleidete) Widerlager sind schwache Mauern, die dem verlorenen Widerlager vorgesetzt werden, um die Optik eines Standwiderlagers zu erhalten. Bei weitgespannten Brücken wurden nach Strukel „immer“ verlorene Widerlager verwendet [Strukel 1913, S. 190–195].

²⁶³ Liebold beschreibt die Ausbildung der ersten Schicht. Die zweite Lage erfolge „sodann“ [Liebold 1877a, S. 259].

²⁶⁴ Vgl. z. B. über die schiefe Brücke von Liebold bei Potschappel/Dresden: „Das Gewölbemauerwerk besteht aus sogen. Konkret-Mauerwerk (System Liebold)“ [Schmidt 1908, S. 442].

²⁶⁵ Vgl. Kap. 5.1.3.

Folge spricht er immer wieder von dieser Brücke,²⁶⁶ auch auf den Briefköpfen der Firma wird die Lennebrücke als deren erstes Brückenbauwerk genannt.

Unter seinen Zeitgenossen stieß Liebolds Brücke auf großes Interesse. Während Wilhelm Housselle 1878 die Brücke noch als Anstoß für die Verwendung von Beton auch im Brückenbau darstellte und darin den Anfang für die Ablösung der französischen, zweischaligen Bauweise – Bruchsteinmauerwerk mit Natursteinverblendungen – durch den Beton sah [Housselle 1878b, S. 15], wurde sie im selben Jahr von E. H. Hoffmann scharf kritisiert [Hoffmann 1878a, S. 37–40].

Hoffmann veröffentlichte zu dieser Zeit seine Monographie *„Eisen, Holz und Stein im Brückenbau“* [Hoffmann 1878a].²⁶⁷ Darin beschäftigte er sich mit den wichtigen Belangen des Brückenbaus, auch unter Verwendung des Baustoffes Beton. Obwohl er als einer der Vorreiter im Betonbrückenbau gesehen werden muss,²⁶⁸ positioniert er sich mehrfach gegen die Verwendung des Baustoffes, in der Monographie²⁶⁹ ebenso wie auch in einem 1878 erschienenen Artikel in der Baugewerks-Zeitung: *„Mauerwerk, bei welchem dem Ungefähr, dem Zufall die unterschiedslose Lagerung der minder festen und der festen Bestandtheile überlassen bleibt, heißt Beton, Concret, Mörtelmauerwerk; – und seine Anwendung (...) ist bei Hochbauten vielfach, bei Brücken, mit Ausnahme der Grundschichten, in der Regel nie berechtigt, und schließt, wo sie stattfindet, stets Unkenntniß derer, welche diese Anwendung veranlassen und Verschwendung mit ein.“* [Hoffmann 1878b, S. 67]. Und im weiteren Text bezeichnet er den Beton als auf tiefster Stufe stehend und als Beweis dafür, wie tief die Ansprüche gesunken seien [Hoffmann 1878b, S. 67]. Zur Begründung seiner Meinung führt er an, dass ein Beton im Bereich hoher Druckfestigkeiten deutlich teurer sei als entsprechendes Steinmaterial und dass die Herstellung hochfester Betone insbesondere in Anbetracht der Kürze der üblichen Bauzeiten noch in den *„Bereich der Hoffnungen“* zu verweisen seien [Hoffmann 1878a, S. 37]. Beton sei nur dort vorteilhaft anwendbar, wo geringe Spannweiten sowie große Pfeilhöhen ausführbar seien. Auf diese Weise seien die Ansprüche an die Druckfestigkeit des Wölbmaterials gering und nur dann könne Mörtelmauerwerk billiger hergestellt werden als Steinmauerwerk [Hoffmann 1878a, S. 39].

²⁶⁶ Z. B. verweist er im Rahmen der Beschreibung zum Wohnhaus Planck nochmals auf die Brücke [Liebold 1877d, S. 458]. Ebenso bei der Beschreibung der Probetreppe [Liebold 1877b, S. 777].

²⁶⁷ Der Autor wird im Buch nicht genannt. Im Nekrolog Hoffmanns wird ihm dieses Buch jedoch eindeutig zugeschrieben [Hacker 1897, S. 108].

²⁶⁸ Vgl. dazu Kap. 4.3, Hoffmann hatte bereits in den 1850er Jahren kleinere Straßenbrücken aus Beton gebaut.

²⁶⁹ *„Mörtelmauerwerk (Concret, Béton, Stampfmörtel-, Gussmörtelmauerwerk usw.) hat im Brückenbauwesen für Herstellung der Bögen im Allgemeinen gar keine, und nur ausnahmsweise, eine Berechtigung des Bestehens.“* [Hoffmann 1878a, S. 37]. Oder im selben Werk: Es „sei auch erwähnt, dass Cementbeton im Brückenbau nur ausnahmsweise Berechtigung hat (...) – Ausgenommen ist der Grundbau natürlich.“ [Hoffmann 1878a, S. 17] sowie das bereits mehrfach, jedoch nicht vollständig zitierte (z. B. [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1895, S. 135–136]; [Stegmann 2014, S. 82]): *„Vom Cementbéton, so wolle man sich merken, ist für den Brückenbau Nichts (Grundbau ausgenommen), als Verdummung der Geister, Rückschritt in der Entwicklung des Gewerbebetriebs von Cement aber ist im Brückenbau ausserordentlicher Fortschritt, und mit ihm der ausserordentlichste Fortschritt im Gewerbebetrieb der Cementezeugung bis zu jetzt jedenfalls unmöglich erachteten Leistungen zu erwarten.“* [Hoffmann 1878a, S. 95].

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Zu Liebolds Lennebrücke äußerte er sich wie folgt: Diese sei nicht wirklich dem Zementbeton zuzuordnen, sondern mehr noch dem Steinbogen. Hoffmann schlug einen im Vergleich zu Liebold wesentlich filigraneren Querschnitt mit einer Scheitelstärke von nur 10 cm vor (Abbildung 4.50). Diesen Entwurf wies er rechnerisch nach und kam zu dem Schluss, dass sowohl die Einsparung an Material als auch daraus folgende Vereinfachungen in den Widerlagern und beim Lehrgerüst zu einer deutlichen Kostenverringerung geführt hätten. Allein die „*nutzlose Verschwendung*“ des Materials in Liebolds Ausführung habe zu einem Preis von 700 M. geführt, sein Entwurf hätte die Kosten auf maximal 400 M. gesenkt [Hoffmann 1878a, S. 42].²⁷⁰ Dennoch sei diese Ausführungsart an und für sich in höchstem Grade zu empfehlen, weil sie ein volles und dichtes Mauerwerk ergebe. Wenn der Mörtelanteil möglichst nur 25–30 % betrage, so trete aufgrund der günstig zu erhaltenden Steine eine Kostenverringerung gegenüber Mauerwerk ein [Hoffmann 1878a, S. 41].

Liebold indes nahm die geübte Kritik an. 1882 veröffentlichte er einen mehrteiligen Artikel über die Kanal- und Brückenarbeiten der Vorwohler Portland-Zementfabrik [Liebold 1882]. Darin beschreibt er wiederum die Lennebrücke, jetzt jedoch unter dem Zusatz, diese sei als Erstlingswerk noch mit mancherlei Fehlern behaftet. Diese betreffen jedoch lediglich die Kosten, nicht die Qualität des Bauwerks. Letztlich bestätigt er hier die Meinung Hoffmanns, dass die Brücke zu üppig bemessen, die Bogenform ungünstig gewählt und zuviel Zement verwendet worden sei [Liebold 1882, S. 19].

Liebold ließ sich jedoch nicht beirren und fuhr mit dem Brückenbau fort. Nach wie vor war der Antrieb der Verkauf des Zementes.²⁷¹ Aus den Jahren nach dem Bau der Lennebrücke sind etliche Brückenbauten bekannt (Abbildung 4.51), von denen nachfolgend der Zeitbereich von 1878–1880 vorgestellt werden soll.²⁷²

Im Jahr 1878 wurde im Dörfchen Glesse,²⁷³ Gemeinde Ottenstein im Landkreis Holzminden, eine bis heute gut erhaltene Bachbrücke mit einer Lichtweite von 8,25 m erbaut (Abbildung 4.52). Wenngleich Liebold diese Brücke als Bruchsteinbrücke bezeichnet und im gleichen Zusammenhang mit der Lennebrücke in Vorwohle nennt

²⁷⁰ In einer Nebenbemerkung zur Lieboldschen Treppe [vgl. Liebold 1877b] bezeichnet er diese als „völlige Bestätigung Alles dessen, was im Vorstehenden an der Bauausführung der Lennebrücke theils getadelt, theils als der Verbesserung fähig bezeichnet ist, wie sie einem, stetem Irrthum unterworfenen Erdgeborenen, wohl selten umfangreicher zu Theil werden möchte.“ [Hoffmann 1878a, S. 42].

²⁷¹ Vgl. „Es ist daher naturgemäß, daß neuerdings einzelne deutsche Cementfabriken und unter ihnen vornehmlich die Vorwohler Portland Cementfabrik die Einführung des Bruchstein-Cementmörtel-Mauerwerks beim Brückenbau selbst in die Hand genommen haben, da sie nicht allein ein großes Interesse daran haben, ihrem Fabrikat ein neues Verwendungsfeld aufzuschließen, sondern ihre Techniker auch am meisten geeignet sind, die Arbeiter auf die sachgemäße Behandlung des Materials einzuüben.“ [Liebold 1880, S. 119–120]. Vgl. auch: „Um nach allen Richtungen hin die weitere Einführung der Bruchsteinbrücken zu fördern, wird zum Schluss noch bemerkt, dass seitens der Vorwohler Fabrik und auch von Seiten des Unterzeichneten jede weitere bezügliche Auskunft bereitwilligst erteilt und dass auch die Anfertigung von einschläglichen Plänen und Anschlägen übernommen wird.“ [Liebold 1882, S. 53].

²⁷² Als Grundlage dienen die Auflistungen der Brückenbauten aus dem ca. 1892 erschienenen Buch zu ausgeführten Durchlässen und Brücken von Liebold [Liebold o. J. (ca. 1892), o. S.; Abbildung 4.51] sowie der von der Firma verwendete Briefkopf, auf dem eine Aufzählung der wichtigsten Brücken und anderer Bauwerke aufgeführt ist [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13]. Ob die Zusammenführung beider Auflistungen alle von Liebold in dem Zeitbereich ausgeführten Brückenbauwerke enthält, kann nicht mit Sicherheit gesagt werden.

²⁷³ Beschreibung im Katalog unter D5.

[Liebold 1882, S. 19], so sind doch deutliche Unterschiede in der Bauweise erkennbar. Die Unterseite des Bogens weist einen doch recht regelmäßigen Verband der Bruchsteine bei relativ geringem Mörtelanteil auf (Abbildung 4.53). Des Weiteren sind hier die Stirnen mit deutlich bearbeiteten Werksteinen verkleidet (Abbildung 4.54). Insgesamt ist diese Brücke daher der Bruchsteinbauweise zuzuordnen und nicht dem Bruchstein-Zementmörtel- bzw. Betonbau.

Eine zweite, im selben Dörfchen Glesse ebenfalls 1878 erbaute Brücke²⁷⁴ fällt durch ihre außerordentliche Schiefe von 37,5° auf (Abbildung 4.55). Die Lichtweite beträgt in Normalenrichtung 8,3 m, der Schiefe entsprechend gemessen jedoch 13,6 m. Mit einer Pfeilhöhe von 1,85 ist diese Brücke schon recht flach gespannt (1/7,3). Während diese Brücke in einer ersten kurzen Notiz in der Deutschen Bauzeitung mit „*Brückenbau in Grobmörtel (Zement-Beton)*“ [Liebold 1878a, S. 310]²⁷⁵ und als eine der Lennebrücke gleiche Art bezeichnet wurde, so muss man wiederum die Untersicht dieser Brücke näher betrachten (Abbildung 4.56). Auch diese Brücke zeigt Bruchsteine, die im für schiefe Mauerwerksbrücken üblichen spiralförmigen Verband vermauert sind (Abbildung 4.57 und Abbildung 4.58). Wenngleich diese Ausführungsart bereits wesentlich vereinfacht und damit billiger war als die einen komplizierten Steinschnitt erfordernde Werksteinbauweise, so nutzte Liebold dennoch den großen Vorteil des Betons beim Bau schiefer Brücken, nämlich den gänzlichen Verzicht auf die spiralförmige Anordnung nicht aus.

In einem wenige Monate später ebenfalls in der Deutschen Bauzeitung erschienenen, korrigierenden Artikel teilte Liebold dann mit, dass die genannte Brücke entgegen der ersten Notiz nicht aus Zementbeton ausgeführt sei, sondern „*mit strengster Beobachtung der an einen guten Verband vorgeschriebenen Regeln*“ [Liebold 1878b, S. 453]. Auch dieses Beispiel zeigt, dass sich Liebold noch nicht gänzlich von der Mauerwerksbauweise gelöst hatte und dass in dieser Zeit des frühen Betonbrückenbaus durchaus auch dessen Spielarten in diesen Überbegriff einbezogen wurden. So sprach ein Empfehlungsschreiben des Weimarer Baurates Scheffer im Jahre 1880 von der Brücke als „*ganz aus Bruchstein-Cementmörtelmauerwerk hergestellt*“ [StadtAIK, Sign. 2186].²⁷⁶ Die Brücke wurde bei deren Einweihung „*zu Ehren ihres Erbauers*“ Liebold-Brücke getauft [Liebold 1882, S. 33], so dass sie in Firmenunterlagen meist unter diesem Namen geführt wird.

Die 1879 ausgeführten Brücken von Salzwedel²⁷⁷ (Abbildung 4.59) und Genthin²⁷⁸ (Abbildung 4.60) sollen hier nur der Vollständigkeit halber genannt werden, da diese mit einem Ziegelgewölbe ausgeführt wurden: In einem zum Brückenbau in Arnstadt (s. u.) angeforderten Referenzschreiben schrieb der für die Entwürfe der beiden Brücken zuständige Regierungsbaurat Opel aus Magdeburg, beide Bauwerke seien mit

²⁷⁴ Beschreibung im Katalog unter D4.

²⁷⁵ Ob dieser Artikel direkt von Liebold stammt ist nicht gesichert.

²⁷⁶ Sein Fazit zur Glessebrücke war äußerst positiv: „Sie ist ein sehr gelungenes Werk, welches in den Kreisen der Fachmänner großes Aufsehen erregt hat, weil es allen Anforderungen, die an solche gestellt werden dürfen, über die Maaßen entspricht und den bisherigen Gewölbtheorien spottet.“ [StadtAIK, Sign. 2186].

²⁷⁷ Vgl. [Liebold 1882, S. 25–26] sowie [Liebold 1882, Bl. II].

²⁷⁸ Vgl. [Liebold 1882, S. 19] sowie [Liebold 1882, Bl. II].

DER MONOLITHISCHE BOGEN

Bruchsteinen im Fundament gebaut worden. Lediglich aufgrund der steinarmen Gegend habe er die Gewölbe in Ziegel ausführen lassen, ansonsten hätte er „*unbedenklich*“ auch für die Bogen Bruchstein in Zementmörtel genommen [StadtAIK, Sign. 2186].²⁷⁹

Zwei kleinere, 1880 erbaute Brücken über die Vippach bei Groß-Rudestedt (ein Bogen mit Lichtweite 6,3 m, Pfeilverhältnis 1/6) sowie über den Hemelbach bei Veckerhagen (ein Bogen mit Lichtweite 7,7 m, Pfeilverhältnis 1/5) konnten bei Vor-Ort-Recherchen nicht ausfindig gemacht werden. Dagegen besteht die im selben Jahr erstellte Gerabrücke in Arnstadt²⁸⁰ bis heute (Abbildung 4.61). Sie verfügt über eine Lichtweite von 13 m bei einer Pfeilhöhe von 2 m (Pfeilverhältnis 1/7). Auffällig bei dieser Brücke sind die weit in den Untergrund reichenden verlorenen Widerlager²⁸¹ (Abbildung 4.62). Auch hier ist von Bruchsteinen und Portlandzementmörtel die Rede [StadtAIK, Sign. 2186], auch wenn bei dieser Brücke die Untersicht doch schon über eine wesentlich geschlosseneren Oberfläche verfügt als die beiden Glesse-Brücken. Die Gerabrücke in Arnstadt ist heute für die Nutzung gesperrt. Eine in unmittelbarer Nähe erstellte „neue“ Brücke übernahm die Aufgabe des Liebold-Bauwerkes. Durch die verlorengegangene Funktion wurden auch notwendige Unterhaltsmaßnahmen eingestellt, so dass sich die Brücke heute in verwahrlostem Zustand befindet.²⁸²

Die ebenfalls 1880 gebaute Ilmbrücke in Bad Berka²⁸³ weist einen Bogen von 14,5 m lichter Weite bei einem Pfeilverhältnis von 1/10 auf. Über diese Brücke ist wenig bekannt, Liebold erwähnt sie weder im 1882 publizierten Artikel in Haarmanns Zeitschrift für Bauhandwerker noch in seiner Monographie zu den ausgeführten Brücken [Liebold o. J. (ca. 1892), Blatt 60]. Der Grund dafür lässt sich lediglich vermuten: Aus der Bauzeit ist noch der Vertrag zwischen der Stadt sowie der Vorwohler Portland-Zementfabrik erhalten [BAmtBB, Sign. keine]. Diesem ist zu entnehmen, dass der Entwurf von einem „*Herrn Baurath Scheffer zu Weimar*“ stammt, der unterzeichnende Vertreter der Zementfabrik war nicht Liebold, sondern Prüssing. Die Verfasserin geht davon aus, dass Bernhard Liebold selbst an diesem Bauwerk wenig oder gar nicht beteiligt war und es deshalb aus seinen Publikationen herausließ. Technisch gesehen – bei einer Spannweite von 14,5 m und vor allem dem sehr kleinen Pfeilverhältnis von 1/10 – hätte diese Brücke jedenfalls Inhalt seiner Artikel sein müssen. Die 1881 ausgeführte Probelastung ergab, dass „*die Brücke als statisch vollkommen sicher bezeichnet und dem beabsichtigten Verkehre unbedenklich übergeben werden*“ könne [BAmtBB, Sign. keine]. Das Bauwerk ist heute noch vorhanden (Abbildung 4.63).

Die letzte in dieser Reihe der von Liebold zwischen 1877 und 1880 erstellten Brücken ist die Bodebrücke in Staßfurt (Abbildung 4.64). Diese verfügte über drei Bogen mit einer Lichtweite von jeweils 14 m sowie 2,33 m Pfeilhöhe (Pfeilverhältnis 1/6). Die

²⁷⁹ Ob diese beiden Brücken noch vorhanden sind, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht endgültig geklärt. Recherchen blieben erfolglos. Auf eine Vor-Ort-Begehung wurde verzichtet, da diese Bauwerke aufgrund der Herstellungsweise mit Ziegeln keine Erkenntnisse für die vorliegende Arbeit versprachen.

²⁸⁰ Beschreibung im Katalog unter D9.

²⁸¹ Vgl. Fußnote 262.

²⁸² Vgl. Kap. 8.3.

²⁸³ Beschreibung im Katalog unter D11.

Gewölbstärke betrug 77 cm im Kämpfer sowie 51 cm im Scheitel [Liebold 1882, S. 51]. Die Kalkulation ergab, dass die Ausführung in Massivbauweise sogar günstiger gewesen sei als der Bau einer Holzbrücke, eine Werksteinbrücke hätte mehr als das Doppelte gekostet [Liebold 1882, S. 51]. Ein im Artikel von 1882 abgedrucktes Protokoll beschreibt ausführlich die Probelastung dieser Brücke: Weder 120 dicht an dicht laufende Ochsen noch sechs schwer beladene Wagen, noch Erschütterungen durch schnelleren Übergang der Wagen noch eine einseitig aufgebrachte Last von 1000 kg/m² haben zu einer merklichen Deformation der Brückenbogen geführt [Liebold 1882, S. 52]. Nach eigenen Aussagen war dies Liebolds erste mehrbogige Brücke [Liebold o. J. (ca. 1892), Blatt 60]. Er schrieb über diese Brücke: „Den ersten und bedeutendsten Platz unter den bislang ausgeführten Bruchsteinbrücken nimmt wegen ihrer Größe und wegen der Anzahl und Auswahl der Bögen die in den letztverflossenen Monaten erbaute fiskalische Bodebrücke in Staßfurt ein.“ [Liebold 1882, S. 42].

Die Brücke wurde im Jahr 1934 durch Stahlbetonkonstruktionen beidseitig verbreitert. Diese Verbreiterungen sollen nach Aussagen der Stadt Staßfurt bei einer turnusmäßigen Brückenprüfung wegen mangelnder Standsicherheit beanstandet worden sein [Aertel 2011]. Die „alte Bogenkonstruktion“, also die Lieboldsche Brücke, sei dagegen in Ordnung gewesen [Aertel 2011]. Dennoch wurde auch dieser Teil im Sommer 2013 abgerissen: Beide mussten einem Neubau weichen (Abbildung 4.65).²⁸⁴

Das Werk Bernhard Liebolds beeinflusste den deutschen Brückenbau nachhaltig. Während Liebold noch als Pionier in der Ausführung von unbewehrten Beton- bzw. Bruchstein-Zementmörtel-Brücken fungierte, folgten ihm viele Firmen auf diesem Gebiet. Die Bauweise wurde weiterentwickelt und immer größere Spannweiten erreicht. Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Erstlingswerk Liebolds, die Vorwohler Lennebrücke, ausfindig gemacht und untersucht werden.

²⁸⁴ Vgl. Kap. 1.1.

5 BAUTECHNIK VON STAMPFBETONBOGENBRÜCKEN

Die Bautechnik massiver Bogenbrücken wurde über Jahrhunderte hinweg entwickelt. Mit dem Aufkommen des Portland-Zementes jedoch vergrößerten sich die Spannweiten. Weiterhin etablierte sich im 19. Jahrhundert die Verwendung kleinteiligerer Materialien zum Bau von Brückengewölben bis hin zum monolithischen Bogentragwerk. Während die Bautechnik grundsätzlich aus dem Mauerwerksbau übernommen wurde, erforderten die spezifischen Ansprüche aus der weiterentwickelten Bauweise Anpassungen in der Bautechnik. Diese Entwicklungen werden in den nun folgenden Kapiteln 5, 6 und 7 beleuchtet.

5.1 Lehrgerüste

5.1.1 Gerüstkonstruktionen

Zentrale Bedeutung beim Bau einer Stampfbetonbrücke kommt dem Lehrgerüst zu. Zu den Anforderungen, denen ein Lehrgerüst entsprechen muss, gehören in erster Linie das Aufnehmen der Lasten während der Bauzeit, die Beständigkeit gegen äußere Einflüsse, die Formgebung und die Wirtschaftlichkeit.

Bei den statischen Funktionen sind mehrere Gesichtspunkte zu betrachten. In erster Linie muss das Lehrgerüst die – im ungünstigsten Fall asymmetrischen – Lasten des Bogens im Bauzustand einschließlich der Materialien, Arbeiter und Maschinen sicher aufnehmen. Dabei muss das Lehrgerüst seine Form beibehalten,²⁸⁵ also über eine gewisse Steifigkeit verfügen. Im Falle von unbewehrtem Beton als Baustoff muss das Lehrgerüst den dynamischen Belastungen durch das Stampfen standhalten. Des Weiteren muss ein Lehrgerüst über Vorrichtungen verfügen, die ein kontrolliertes, gleichmäßiges Absenken des Gerüsts erlauben.²⁸⁶

Als äußere Einflüsse, die auf ein Lehrgerüst einwirken, sind in erster Linie Temperaturschwankungen und die damit verbundenen Längenänderungen der Gerüstteile zu beachten. Hinzu kommen Feuchtigkeitseinflüsse aus Regen oder Schnee, die zu einem Quellen der Hölzer führen.²⁸⁷ Ein weiterer wichtiger Punkt bei Flussbrücken war die Strömung insbesondere bei Hochwasser,²⁸⁸ das zu ernststen Schäden bis hin zur Zerstörung des Lehrgerüsts führen konnte. Des Weiteren waren bauwerksabhängige Randbedingungen zu berücksichtigen, denen ein Lehrgerüst Rechnung tragen musste, wie etwa das Freihalten des Profils für den Straßen-, Eisenbahn- bzw. Schiffsverkehr oder der notwendige Verzicht auf Zwischenstützen bei Überbrückung tiefer Schluchten.

Die Wirtschaftlichkeit hing im Wesentlichen vom gewählten Material ab. Dazu zählten aber auch eine einfache Handhabung und eine mögliche Wieder- oder Weiterverwendung

²⁸⁵ Vgl. Kap. 6.2.1.

²⁸⁶ Vgl. Kap. 5.1.2 und 6.2.2.

²⁸⁷ Temperatur- und Feuchtigkeitseinflüsse; vgl. Kap. 6.2.1.

²⁸⁸ Vgl. beispielsweise die Beschreibungen von Örley zur Isonzobrücke bei Salcano: „Die (...) ungestümen Hochwässer (...) brachten es mit sich, daß von der Herstellung eines Holzjoches zur Unterstützung des Lehrgerüsts in der Brückenmitte Abstand genommen werden mußte“ [Örley 1910, S. 546].

der Bauteile. Leichter Auf- und Abbau wurden im Handbuch der Ingenieurwissenschaften als Nebenbedingungen bezeichnet [Schäffer, Sonne 1886, S. 275].

Um diese Anforderungen zu erfüllen, besteht ein konventionelles Lehrgerüst im Allgemeinen aus folgenden Teilen: Unterbau, Untergerüst, Lehrbogen (Obergerüst), Ausrüstungsvorrichtungen, Schalung [Schönhöfer 1911, S. 43]. In einem ersten Abschnitt wird das Lehrgerüst mit Unterbau, Untergerüst und Lehrbogen betrachtet. Die Ausrüstungsvorrichtungen²⁸⁹ sowie die Schalung²⁹⁰ werden jeweils in einem eigenen Kapitel gesondert dargestellt.

Eine genaue Definition von Unterbau, Untergerüst und Lehrbogen lieferte Robert Schönhöfer in seiner Monographie über die Gerüste im Brückenbau [Schönhöfer 1911, S. 44–47]. Zur Veranschaulichung sei als Beispiel die Moselbrücke bei Mehring²⁹¹ gewählt (Abbildung 5.1, Abbildung 5.2 und Abbildung 5.96).²⁹² Die Lehrbogen – analog zu den Begriffen bei Dachwerken auch Binder oder Gespärre genannt – bestehen jeweils aus Bogenkranz, Fachwerk und Bogenschwelle. Der Bogenkranz ist das oberste Bauteil, das die Form des Bogens darstellt und bei kleineren Spannweiten aus einfachen Bohlen besteht. Bei größeren Weiten werden stärkere Felgen oder Kranzhölzer verwendet, die an den Stoßstellen gestützt werden. Die Ausbildung des Lehrbogenfachwerks kann in vielerlei Weise ausgeführt werden. Auf die Gerüstarten wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch einzugehen sein. Die Bogenschwelle bildet den unteren Abschluss des Obergerüsts, in die Stützen, Streben und Ständer einbinden. Bei flach gespannten Gewölben legte man die Bogenschwelle in Kämpfernähe (Abbildung 5.2). Bei stärker gekrümmten Bogen, bei denen die Kämpferbereiche sich selbst tragen können, wurde sie höher angesetzt, was den Vorteil kürzerer Bauteile im Obergerüst hatte.²⁹³ Diese konnten somit schwächer ausgeführt werden. Der Abstand der Lehrbogen voneinander betrug etwa 1 bis 2 m, am häufigsten wurde in der Praxis ein Abstand von etwa 1,5 m gewählt [Schönhöfer 1911, S. 45]. Bei diesem Gespärreabstand ergab sich eine günstige Dimensionierung von Schalung und Tragwerk. Die Randbinder mussten nach innen versetzt werden, um eine gleichmäßige Spannungsverteilung der äußeren im Vergleich zu den inneren Lehrbogen zu erhalten.²⁹⁴ Des Weiteren wurden die Lehrbogen mit einer Überhöhung ausgeführt, um die Senkungen des Bogens beim Ausrüsten auszugleichen.²⁹⁵

²⁸⁹ Vgl. Kap. 5.1.2.

²⁹⁰ Vgl. Kap. 5.1.3.

²⁹¹ Stampfbetonbrücke erbaut von Bernhard Liebold, Holzminden in den Jahren 1903–1904. Vgl. auch Kap. 5.1.4.

²⁹² Ein weiteres anschauliches Beispiel der Dreiteilung im Gerüst stellt die Illerbrücke in Kempten dar (Abbildung 5.3; Beschreibung im Katalog unter BY5). Das dortige hölzerne Obergerüst ruht auf dem eisernen Untergerüst und einem Unterbau aus massiven Pfeilern. Abbildung 5.4 zeigt das Lehrgerüst der Friedensbrücke in Plauen (ursprünglich Syrtalbrücke oder König-Friedrich-August-Brücke, zwischenzeitlich Friedrich-Ebert-Brücke, heute Friedensbrücke. Die Verfasserin verwendet den aktuellen Namen.). Hier wurde das Untergerüst direkt auf den tragfähigen Baugrund aufgestellt, so konnte auf einen Unterbau verzichtet werden.

²⁹³ Vgl. das Beispiel des Bahnviaduktes in Herisau, Schweiz, im weiteren Verlauf dieses Kapitels.

²⁹⁴ Vgl. Kap. 6.2.1. Im gewählten Beispiel der Moselbrücke Mehring ist dies nicht so ausgeführt worden. Abbildung 5.1 zeigt auch den Querschnitt, dort ist zu erkennen, dass die äußeren Lehrbogen im Scheitel am Rand des Gewölbes liegen. Auch andere von der Verfasserin überprüfte Bogengerüste wiesen diesen Versatz

Das Untergerüst richtete sich in der Konstruktion einerseits nach dem Profil des Baugrundes und andererseits nach dem Obergerüst und hatte in der Regel gleich viele Gespärre wie dieses. Zwischen dem oberen Abschluss des Untergerüstes und der Bogenschwelle der Lehrbogen wurden zumeist die Ausrüstungsvorrichtungen eingebracht [Schönhöfer 1911, S. 47]. Zur Erhöhung der Stabilität konnten sowohl Ober- als auch Untergerüst mit schrägen Stützen ausgestattet werden (Abbildung 5.64).

Der Unterbau schließlich besteht aus allen Konstruktionen, die sich zwischen Untergerüst und Baugrund befinden. Hierzu zählen in erster Linie eingerammte Pfähle oder Pfahljoche,²⁹⁶ Steinkästen, gemauerte Pfeiler,²⁹⁷ Schwellenstapel oder Ähnliches [Schönhöfer 1911, S. 47]. Gerüste mussten nicht zwingend über alle vorbeschriebenen Teile verfügen. So wurde abhängig von den Rahmenbedingungen bei flach gespannten Brücken oftmals auf das Untergerüst verzichtet. Die Abbildung 5.5 zeigt die Baustelle der Almebrücke bei Elsen²⁹⁸ mit einer Spannweite von 46 m: Deutlich zu erkennen ist, dass das Obergerüst hier direkt auf dem Unterbau aufliegt – ein Untergerüst ist nicht vorhanden.²⁹⁹

Das in der Hauptsache verwendete Material war Holz.³⁰⁰ Eine umfangreiche Auflistung der Vorteile der hölzernen Lehrgerüste und auch Schalungen im Vergleich mit dem Werkstoff Eisen lieferte der Belgier Armand Mahiels in seiner Monographie „*Le béton et son emploi*“ [Mahiels 1893, S. 196]:

- Holz sei in der Anschaffung billiger als Eisen und das umso mehr als die im Handel vorhandenen Abmessungen sowie die am häufigsten vorkommenden Holzarten verwendet werden können.
- Holz sei im Gegensatz zum Metall überall einfach zu beschaffen.
- Holz könne man nach den Anforderungen bearbeiten, Eisen jedoch sei bereits in bestimmten Profilen zu bestellen.

der äußeren Lehrbogen am Scheitel nicht auf (z. B. Illerbrücken in Kempten), auch wenn dies in der Literatur so vertreten wurde. Dieser Widerspruch mag auch daher rühren, dass sich die meisten Brückenbogen zur Erhöhung des Widerstandes gegen Windlasten gegen den Kämpfer hin verbreiterten und damit die gleichmäßige Belastung der äußeren Lehrbogen in jedem Fall schwierig zu gewährleisten war.

²⁹⁵ Vgl. Kap. 6.2.2.

²⁹⁶ Meist bei nicht tragfähigem Boden verwendet.

²⁹⁷ Ein gemauerter Unterbau wurde meist dann verwendet, wenn bedeutende Lasten abgeleitet oder Stützpunkte in starker Strömung ausgeführt werden mussten [Schönhöfer 1911, S. 13].

²⁹⁸ Erbaut von Bernhard Liebold, Holzminden, aufgelistet in den Bauausführungen von 1909 und 1910.

²⁹⁹ Vgl. auch das Lehrgerüst der Augustusbrücke in Dresden in der Abbildung 5.6.

³⁰⁰ Vgl. beispielsweise folgende Äußerungen: „in diesem Sinne sei nur ein Hinweis auf den eigenthümlichen Umstand gestattet, daß noch fast nirgends Eisenkonstruktion bei Lehrgerüsten in Anwendung gekommen ist.“ [Dietrich 1882, S. 125–126] oder „Im Bau, der Konstruktion und Berechnung der Lehrgerüste hat das letzte Jahrzehnt nur wenige Fortschritte zu verzeichnen; die Gerüste werden meist noch nahezu vollständig aus Holz gebaut (...). Die Verwendung des Eisens zu den Lehrgerüsten ist noch nicht weit vorgeschritten.“ [Leibbrand 1897b, S. 80]; „Zu Brückengerüsten findet das Eisen als selbständiger Baustoff nur sehr selten Anwendung. Die Fälle, wo man Lehrgerüste oder Aufstellungsgestelle aus Eisen hergestellt hat, stehen ganz vereinzelt da.“ [Schönhöfer 1911, S. 4] oder noch im Jahre 1913: „Auf Grund von Erwägungen wirtschaftlicher und praktischer Art kommen beim Gewölbebau heute in den meisten Fällen hölzerne Lehrgerüste zur Anwendung.“ [Gilbrin 1913, S. 27].

- Holzschalungen seien mittels einiger Nägel einfach anzubringen und sorgen für Stabilität. Das Zusammenfügen metallener Platten erfordere jedoch aufwendigere Verbindungsmittel, die wiederum rosten, brechen oder sich verschieben können.
- Holz verforme sich kaum, gegenüber Erschütterungen verhalte es sich sehr elastisch. Auf diese Weise könne man beim Ausrüsten ganze Teile des Gerüsts fallen lassen. Eisen dagegen würde sich in diesem Falle verbiegen, verziehen oder brechen.
- Holz sei in der Bearbeitung weniger gefährlich; Eisen stelle durch scharfe Kanten und Grate eine Bedrohung für den schnellen Arbeiter dar.
- ein Blech sei bei Beschädigung nicht mehr verwendbar während man bei Holz den beschädigten Teil entfernen könne.
- Holz könne sich bei unerwarteten Änderungen besser anpassen, so könne etwa bei vergessenen Einbauten eine Öffnung in die Schalung geschnitten werden während man beim Eisen rückbauen müsse.
- Die Herstellung der Schalung mit Eisen sei bei vorab fixierten Abmessungen mit größter Präzision und damit verbundenem hohen Arbeitsaufwand auszuführen. Das Holz werde einfach nebeneinander gelegt und wenn ein Teil zu lang sei, werde es vor Ort abgesägt.
- eine Bohle könne als Abdeckung, Pfosten, Rampe usw. verwendet werden, während Eisen lediglich für die vorgesehene Funktion angewendet werden könne.
- das Metall oxidiere.
- Holz nehme schneller die Feuchtigkeit oder das überschüssige Wasser aus dem Beton auf.
- Das Ausschalen sei mit Holz schneller ausführbar [Mahiels 1893, S. 196].

Der Berliner Professor Emil Dietrich berichtete, der Einsatz von eisernen Lehrgerüsten sei dort zu erwägen, wo im Falle fortlaufender Viadukte dasselbe Gerüst mehrfach verwendet werden könne [Dietrich 1882, S. 125–126].³⁰¹ Weiterhin bot der Werkstoff Eisen mit seiner höheren Materialfestigkeit dort Vorteile, wo wegen geringer Bauhöhe Sonderlösungen für das Gerüst notwendig waren, also insbesondere beim Freihalten von Durchfahrten für Straßen-, Eisenbahn- bzw. Schiffsverkehr. Einen weiteren Nutzen bildete die geringere Zusammendrückbarkeit eines eisernen Lehrgerüsts und damit verbundene geringere Senkungen [Strukel 1913, S. 216].³⁰² Die Anwendung des Eisens erfolgte demnach meist nur für einen Teil des Gerüsts [Strukel 1913, S. 216]. Beispiele hierfür bilden die Lehrgerüste der Augustusbrücke in Dresden (Abbildung 5.6) und der Illerbrücken in Kempten (Abbildung 5.3). Während bei der Augustusbrücke³⁰³ das Obergerüst aus Eisen auf einem hölzernen Unterbau steht, zeigt das Kemptener Gerüst hölzerne Lehrbögen auf eisernem Untergerüst.

³⁰¹ Beispielsweise auch, wenn mehrere Brücken mit gleichen Abmessungen gebaut wurden, vgl. hierzu Kap. 5.1.4.

³⁰² Vgl. Kap. 6.2.1 oder die Aussage von Prof. Dietrich: „Die Eisenconstruction dürfte doch (...) dort in Frage zu ziehen sein, (...) wo man bei großen Spannweiten zur Herstellung freitragender Gerüste genöthigt ist, aber erhebliche und nicht genau bestimmbare Einsenkungen der hölzernen Lehrbögen fürchtet.“ [Dietrich 1882, S. 125–126].

³⁰³ Beschreibung im Katalog unter Sa6.

Bei den Gerüsttypen sind zwei grundsätzlich verschiedene Gruppen zu unterscheiden: freigesprengte und feste (unterstützte) Gerüste. Dabei liegen die ersteren lediglich auf zwei Stützpunkten i. A. an den Kämpfern des zu erstellenden Bogens auf. Die letztere Gruppe dagegen stützt sich auf eine größere Anzahl von Punkten, bei denen die Lasten über Pfosten usw. direkt in den Untergrund abgeleitet werden.

Feste Gerüste hatten dabei den Vorteil, dass sich die Lehrbogen weniger senkten. Dagegen sprachen mitunter die Randbedingungen gegen die Unterstützung, insbesondere bei Überbrückung tiefer Schluchten, bei Viadukten mit hohen Pfeilern oder auch wenn die starke Strömung eines Flusses, speziell bei häufigen Hochwassern oder Eisgang, eine Stützkonstruktion in Gefahr bringen konnte. Ein weiterer Vorteil des gesprengten Gerüsts war die Lastverteilung: Bereits in der Bauphase wurden die Lasten in die Widerlager oder Pfeiler eingeleitet, die statischen Verhältnisse änderten sich also mit dem Ausrüsten kaum noch [Barkhausen 1892, S. 303].³⁰⁴

Die Wahl der Gerüstart fiel im 18. und frühen 19. Jahrhundert oftmals zugunsten des freigesprengten Gerüsts aus.³⁰⁵ Eines der bekanntesten Beispiele hierfür ist Perronets Pont de Neuilly. Ausführlich beschrieb er die Probleme während des Baus und die immensen Senkungen des Scheitels. Einer der Hauptgründe dafür lag in der Verwendung flexibler Gerüste (Abbildung 5.7). Perronet bemerkte den Zusammenhang zwar, zog aber falsche Schlüsse: Man solle das Gerüst möglichst flexibel bauen, um die notwendigen Bewegungen des Gerüsts zu erleichtern [Perronet 1793, S. 14].³⁰⁶ Perronets Vorbild verbreitete sich und wurde europaweit bis weit ins 19. Jahrhundert verwendet [Holzer 2012, S. 591–592].³⁰⁷

In den Jahren 1808–1813 erfolgte der Bau des Pont d'Iéna in Paris. Der zuständige Ingenieur Mandé-Corneille Lamandé publizierte 1814 eine Beschreibung dieser Brückenkonstruktion und deren Ausführung [Lamandé 1814].³⁰⁸ Dabei bezog er sich wiederholt auf Perronet, beispielsweise habe er die Bogenstärken nach Perronetschem Vorbild gewählt [Lamandé 1814, S. 11].³⁰⁹ Auch das Lehrgerüst weist deutliche Ähnlichkeit zu den Perronetschen Vorbildern auf, jedoch mit dem bedeutenden Unterschied, dass Lamandé Stützen unter die Konstruktion stellte (Abbildung 5.8). Diese bezeichnete er dann auch als „*cintres fixes*“, also als unterstützte Gerüste [Lamandé 1814,

³⁰⁴ Vgl. auch „Immerhin braucht man die Anwendung sogen. gesprengter Gerüste nicht zu scheuen, welche insofern vor den direkt unterstützten einen Vorzug besitzen, als sie die Last des Gewölbes von vorn herein nach denjenigen Punkten der Widerlager hin übertragen, an denen dieselbe später aufgenommen werden muss. Daher findet, wo gesprengte Gerüste angewendet werden, bei der Ausrüstung kein so grosser Wechsel in der Lastverteilung und wahrscheinlich keine so grosse Formänderung des Bogens statt, als wenn bei der Ausführung direkt unterstützte Gerüste zur Verwendung kommen.“ [Büsing 1892, S. 257].

³⁰⁵ Vgl. hierzu die ausführliche Betrachtung zu diesem Thema in [Holzer 2012].

³⁰⁶ Original: „pour faciliter le mouvement que prennent nécessairement les cintres“.

³⁰⁷ Z. B. von [Claudé, Laroque 1859] und [Dejardin 1860] noch so vertreten [Holzer 2012, S. 591–592].

³⁰⁸ Lamandé nennt die Brücke „Pont de l'École militaire“. Es handelt sich hierbei um dieselbe Brücke [z. B. Pugin, Heath 1829, S. 128].

³⁰⁹ Er beschreibt, dass er bei ähnlichen Randbedingungen und ähnlichem Material entsprechende Abmessungen wie beim Pont Louis XVI von Perronet gewählt habe. Dieser habe seinen Brücken immer einen Charakter der Leichtigkeit und Eleganz vermittelt. Seine umfangreichen Erfahrungen haben als Anleitung für andere Ingenieure gedient, Dauerhaftigkeit und Kühnheit zu vereinen [Lamandé 1814, S. 11].

S. 12].³¹⁰ In einer ein Jahr später erschienenen Beschreibung eines anderen Brückenbaus bewertete er die Verwendung der festen Gerüste: Diese seien mit Erfolg beim Pont d'Iéna mit einer Lichtweite von 28 m und 3,3 m Pfeilhöhe eingesetzt worden, wo die Senkung des Scheitels lediglich 11 cm betragen habe. Aus dieser Erfahrung könne man auf die Senkungen der projektierten Brückenbogen schließen und diese seien vergleichsweise gering [Lamandé 1815, S. 75–76].

Ernsthaften Gegenwind erfuhr die Perronetsche Ansicht, Bewegungen des Bogens seien durch flexible Gerüste zu erleichtern, in der Monographie von Émiland-Marie Gauthey oder noch wahrscheinlicher durch dessen Neffen Navier, der als Herausgeber dieses posthum erschienenen Werkes fungierte.³¹¹ In dem „*Traité de la construction des ponts*“ wurden die Erfahrungen bezüglich der Bewegungen im Bogen beschrieben. Auch Navier verwies in diesem Text auf den Pont d'Iéna in Paris. Man habe die Frage bezüglich fester oder flexibler Gerüste beim Bau dieser Brücke zugunsten ersterer Bauart entschieden [Gauthey, Navier 1813, S. 8].³¹² Die Gerüste von Perronet bieten wenig Festigkeit, obwohl sie einen großen Einsatz an Holz verlangen. Aus der mangelnden Widerstandskraft gegen Formänderungen ergeben sich Schwierigkeiten in der Ausführung der Gewölbe. Beim Verlegen der Steine werde das Gleichgewicht im Bogen wiederholt gestört – das Lehrgerüst befinde sich in einem andauernden Zustand der Bewegung [Gauthey, Navier 1813, S. 7]. Perronets „*cintres retroussés*“ verwarf Navier: Die festen Gerüste scheinen kaum empfindlich gegenüber Formänderungen oder Senkungen während des Versetzens der Werksteine zu sein. Sie haben daher gegenüber den freigesprengten Gerüsten den unbestreitbaren Vorteil, eine größere Sicherheit in der Konstruktion zu bieten sowie Form und Festigkeit des Gewölbes keineswegs zu beeinträchtigen [Gauthey, Navier 1813, S. 10].³¹³

Im Laufe des 19. Jahrhunderts gewann die Naviersche Ansicht an Gewicht.³¹⁴ Konnten die Perronetschen Brücken, die mit Kalkmörteln ausgeführt wurden, gewisse Bewegungen noch aufnehmen, so änderten sich die Ansichten spätestens mit der Verwendung hydraulischer, schneller erhärtender Bindemittel. Eine rückblickende Beschreibung aus dem Jahr 1891 berichtet: Für die Brücken in Nogent, Neuilly und Mantes habe man freigesprengte Gerüste verwendet, die eine gewisse Elastizität aufweisen. Perronet habe dies als notwendig betrachtet, um den unvermeidbaren Bewegungen des Bogens folgen zu können. Der Einsatz von hydraulischen Mörteln verringere das Ausmaß der Setzungen und man versuche, jegliche Bewegung im Mauerwerk zu unterbinden und man baue daher

³¹⁰ Der Nekrolog über Louis Bruyère, Inspecteur Général des Ponts et Chaussées, behauptet allerdings, Lamandé habe diesen Vorschlag von Bruyère übernommen [Navier 1833, S. 390].

³¹¹ Gauthey verstarb 1806, vgl. [Holzer 2012, S. 592].

³¹² Original: „La question des cintres fixes ou mobiles a été examinée au Conseil des Ponts et chaussées, à l'occasion de la construction des voûtes du pont d'Iéna, et décidée à l'avantage des premiers. Le succès de l'exécution de ces voûtes a confirmé la justesse de cette décision.“

³¹³ Original: „Les cintres portés sur des points d'appui, (...) ne paraissent pas susceptibles de changer sensiblement de forme, ni même de tasser beaucoup pendant la pose des voussoirs. Ils ont donc sur les cintres retroussés l'avantage incontestable d'offrir beaucoup plus de sûreté dans la construction, et de ne point exposer la forme et la solidité de la voûte à se trouver altérée.“

³¹⁴ Vgl. [Holzer 2012, S. 592]. Dort wird auch der Einfluss der englischen Ingenieure besprochen.

sehr steife Gerüste³¹⁵ [Morandière 1891, Bd. 1, S. 184–185].³¹⁶ Zum Ende des 19. Jahrhunderts war die Verwendung fester Gerüste – bei passenden Randbedingungen – obligatorisch. Insbesondere der Einsatz von Stampfbeton mit seinen aus dem Verdichten herrührenden zusätzlichen dynamischen Lasten machte eine hohe Steifigkeit des Lehrgerüsts³¹⁷ sowie der Schalung³¹⁸ erforderlich. Ein frühes Beispiel dieser Aussagen wurde im Zusammenhang mit dem Bau der Flussüberquerung bei Moret-sur-Loing im Rahmen des Vanne-Aquäduktes gemacht. In der Abbildung 5.9 ist die folgende Notiz zu finden: „Beim Stampfbeton sind sehr kräftige Lehrgerüste und sehr beständige Schalungen notwendig.“³¹⁹ [Oppermann 1873, Tafel 3–4].³²⁰

Lediglich als Einzelfälle sind die Aussagen zu werten, die im frühen 20. Jahrhundert eine hohe Steifigkeit des Lehrgerüsts als Nachteil ansahen. Beim Bauunfall³²¹ der Corneliusbrücke³²² in München im Jahr 1902, wo gemäß Landesbaurat Max Leibbrand aus

³¹⁵ Original: „Pour ces ponts de Nogent, de Neuilly et de Mantes, on avait employé des cintres retroussés, c'est-à-dire reposant seulement sur deux points d'appui aux naissances et composés de pièces présentant une certaine élasticité dans les assemblages. – Perronet considérait ces cintres comme nécessaires pour les grandes arches, parce que les charpentes pouvaient suivre en quelque sorte les mouvements des voûtes, et que les courbes n'en subissaient aucun jarret. Aujourd'hui l'emploi de mortiers plus énergiques permet de diminuer beaucoup l'étendue des tassements, on cherche à éviter tout mouvement dans les maçonneries, et on construit les cintres avec une grande fixité.“

³¹⁶ Sehr ähnliche Aussage: „Diese von Perronet eingeführten Binder (...) erfreuten sich zu Perronet's Zeiten und später in Frankreich und anderen Ländern lange Zeit einer grossen Beliebtheit. Mit ihrer Hilfe sind bekanntlich viele der bedeutendsten und kühnsten Brücken eingewölbt worden (...). Heute finden sie mit Recht keine Anwendung mehr, denn die aus dem ausserordentlich flachen Aufsatzwinkel sämtlicher Streben herrührende starke Senkung unter der Gewölbelaast verstösst gegen eine der wichtigsten Bedingungen, die man an ein Lehrgerüst heute stellt, d. i. dass es möglichst unwandelbar sei. In früherer Zeit hielt man es allerdings noch für ein Erfordernis eines guten Lehrgerüsts, dass es unter der Gewölbelaast eine gewisse Nachgiebigkeit zeige und ordnete daher auch die Verbindungsstellen der Streben usw. so an, dass eine Drehung der letzteren leicht stattfinden konnte. Viele Ingenieure haben übrigens auch damals schon in richtiger Erkenntnis der Schwäche der Perronet'schen Lehrgerüste bei deren Herstellung zur Verhütung der Scheitelsenkung eine Unterstüzung angebracht.“ [Landsberg 1899, S. 244].

³¹⁷ Vgl. beispielweise: „Hinsichtlich der Lehrgerüste ist grösstmögliche Festigkeit, namentlich auch gegen Erschütterungen Haupterforderniss. Die Steifigkeit des Gerüsts wird in der Regel bei der Gerüstform mit sog. direkter Unterstüzung am grössten sein; wo sich für letztere kein Hinderniss bietet, wird man sie vorziehen, zumal die direkt unterstützten Gerüste, auch was die Scheitelsenkung beim Ausrüsten und die Kosten betrifft, gewöhnlich im Vorzuge sein werden.“ [Büsing 1892, S. 256–257].

³¹⁸ Vgl. beispielsweise: „Die Verschalung zur Herstellung solcher Gewölbe ist ganz ähnlich wie die für Mauerwerk, nur entsprechend stärker und standfester, wegen der durch das Stampfen des Betons entstehenden Erschütterungen.“ [Dyckerhoff 1888, S. 22]; oder „Insbesondere für das Stampfen von Betongewölben ist eine feste, unnachgiebige Schalung erforderlich.“ [Melan 1911, S. 323] oder „Der beim Stampfen ausgeübte örtliche Druck und die Erschütterungen bedingen eine besondere Steifigkeit der Einschaltungen.“ [Büsing 1905, S. 309].

³¹⁹ Original: „Nota. Pour le Beton Coignet il faut des Cintres très forts et des moules très durables.“

³²⁰ Von der Planung der Illerbrücke in Lautrach (vgl. Kap. 8.4) ist bekannt, dass das Gerüst mit einem Aufschlag von 1,5 auf die ruhenden Lasten versehen wurde, um die dynamischen Lasten aus dem Stampfen zu berücksichtigen [Beutel 1903; 1904, S. 3].

³²¹ Beim Bau der Corneliusbrücke kam es am 26.08.1902 zum Einsturz des Lehrgerüsts eines Bogens. Dabei kamen zahlreiche Arbeiter zu Schaden. In der Folge wurden mehrere Gutachter zu Rate gezogen, die über die Ursachen des Unglücks spekulierten. Eine Hauptvermutung für die Ursache war die Belastung der Schwellen quer zur Faser, gesichert konnte dies jedoch nicht festgestellt werden. Ausführlich in [Binswanger 1903].

³²² Beschreibung im Katalog unter BY14.

Sigmaringen³²³ der Auslöser nicht in der Überbelastung der Hölzer, sondern in der Verwendung von Spindeln mit Kugellagern lag [Leibbrand 1906a, S. 611], wurde in einem früheren Artikel ebenjener Autor wie folgt zitiert: „Als letztes möchte ich nun noch das Gutachten des Herrn Landesbaurat Leibbrand (Sigmaringen) besprechen, welches schon aus dem Grunde hohes Interesse bietet, weil Leibbrand wohl die bedeutendste Autorität auf diesem Gebiete ist. Das erste, was Leibbrand auffiel, als er die Baustelle betrat, war die übermäßig starke Dimensionierung der Gerüste; es sei dies ein Fehler, welcher das Gerüste völlig unelastisch machte, und ihm die Fähigkeit nahm, den kleinen, notwendig eintretenden Formänderungen nachgeben zu können.“ [Binswanger 1903, S. 310].³²⁴ Abgesehen von solchen Einzelaussagen muss das feste Gerüst jedoch im Stampfbetonbrückenbau bei passenden Randbedingungen als obligatorisch gewertet werden.

Die beiden Gruppen von Lehrgerüsten – frei gesprengte und unterstützte – wurden im bisherigen Text bereits beschrieben. Innerhalb dieser Gruppen gab es verschiedene Konstruktionstypen, deren Systeme im Folgenden vorgestellt werden sollen. Dies kann nur eine grobe Einteilung darstellen, da in der Praxis die verschiedenen Systeme meist kombiniert wurden.

Frei gesprengte Gerüste

Die freigesprengten Gerüste wurden als Dreieck-, Trapez- oder Vieleck-Sprengwerk ausgeführt. Die Vieleck-Sprengwerke (Abbildung 5.10), die Perronet verwendete, sind bereits besprochen worden. Deren Nachteil war die große Beweglichkeit. Schönhöfer bezeichnete die Vieleck-Konstruktion in seinem Gerüstbuch deshalb auch als „*unter allen Umständen labile[s, Erg. d. Verf.] System*“, das nur in versteifter Form Anwendung finden dürfe [Schönhöfer 1911, S. 55]. Wesentlich besser eigneten sich die sogenannten Dreiecksprengwerke (Abbildung 5.11), da das Dreieck als Konstruktionselement bis auf elastische Formänderungen starr und unverschieblich ist [Schönhöfer 1911, S. 53]. Abbildung 5.12 zeigt mehrere Ausführungen von Trapez-Sprengwerken: Das Trapez bestand aus zwei Sprengstreben, einem Sprengriegel und unter Umständen aus einem Streckbalken [Schönhöfer 1911, S. 54]. Da das Trapez in seiner Grundform lediglich bei ideal symmetrischer Belastung stabil ist, muss dieses Sprengwerk entsprechend versteift werden [Schönhöfer 1911, S. 54]. Trapezsprengwerke erlaubten meist eine einfachere Konstruktion als Dreiecksprengwerke [Landsberg 1899, S. 243].

Für die Ausbildung der Auflagerpunkte gab es mehrere Möglichkeiten. Joseph Melan beschrieb 1890 die Konstruktion mit Hilfe von Tragsteinen³²⁵ (Abbildung 5.13): Diese 40 cm weit ausladenden Steine seien auf Kämpferhöhe in den Pfeiler eingemauert. Darauf sei

³²³ Nicht zu verwechseln mit Karl von Leibbrand. Beide waren in etwa gleichzeitig im süddeutschen Raum im Brückenbau tätig und beide sind zu den bedeutendsten Brückeningenieuren ihrer Zeit zu zählen. Ein direkter verwandtschaftlicher Bezug zwischen beiden konnte nicht festgestellt werden.

³²⁴ Im Jahr 1911 erscheint ein Artikel über die Nachteile steifer Lehrgerüste beim Gewölbebau [Aylet 1911]. Dort wird beschrieben, dass Bauunfälle nahezu ausschließlich auf steife Lehrgerüste zurückzuführen seien. Des Weiteren beschrieb er eine Möglichkeit, eine flexible Konstruktion in Anlehnung an die Bauweise von Hängebrücken zu verwenden. Diese wurde zumindest an einem Versuchsbogen erfolgreich getestet, eine weitere Verbreitung ist nicht bekannt.

³²⁵ auch Kragstein. Melan bezeichnet diese Konstruktion jedoch ausdrücklich als Tragstein, weshalb Verfasserin diesen Begriff verwendet.

das Lehrgerüst auf Keilen und Sandtöpfen aufgestützt worden [Melan 1890a, S. 77]. Solche Tragsteine wurden oftmals auch nach dem Ausrüsten belassen und man kann sie bis heute an Brücken sehen, beispielsweise beim Murgtalbahn-Viadukt über die Tennetschlucht³²⁶ zwischen Langenbrand und Forbach im Schwarzwald (Abbildung 5.14).

Die Abbildung 5.15 zeigt mehrere Pfeiler des Viaduktes von Grandfey³²⁷ in der Nähe von Fribourg in der Schweiz (1925–1927). In den Bogen sind im Kämpferbereich nebeneinanderliegende Tragsteine zu erkennen. Diese waren im vorliegenden Fall nicht für das Gerüst, sondern für die Schalung (Abbildung 5.16). Der Grund hierfür ist, dass dieses Bauwerk in Melan-Bauweise, also mit einbetonierten eisernen Trägern, erbaut wurde und deshalb auf ein Lehrgerüst verzichtet werden konnte.

Eine andere Möglichkeit der Auflagerung bilden am Pfeiler angebaute Kränze: Der Pont Neuf in Albi,³²⁸ erbaut 1868, führt die Eisenbahn in schiefem Winkel über den Tarn (Abbildung 5.17). Der Bau schiefer Brücken erforderte auch besondere Lehrgerüstkonstruktionen. Im vorliegenden Fall kann man erkennen, dass die Gewölbe aufgelöst wurden in einzelne Bogen. Diese Bogen stützen sich auf die Pfeiler, die so konstruiert sind, dass auch das Lehrgerüst sich darauf abstützen konnte. Ein zweiter Absatz im Pfeiler, direkt über dem Wasserstand, wurde ebenfalls für die Gerüstkonstruktion verwendet (Abbildung 5.18).

Die Abstützungen für das Lehrgerüst mussten nicht zwingend aus eingemauerten Steinen bestehen. An einigen Beispielen kann man sehen, dass hier auch Eisen verwendet wurde. Ein sehr eindrückliches Beispiel ist hier der Landwasserviadukt der Albulabahn in der Nähe von Filisur in der Schweiz. Das Bauwerk wurde 1901–1902 erbaut. Es besteht aus sechs jeweils 20 m weiten Bogen [N. N. 1904c, S. 42]. Aufgrund der hohen Pfeiler waren frei gesprengte Gerüste notwendig (Abbildung 5.19 bis Abbildung 5.21). Die Abbildung 5.19 zeigt die Konstruktion der Lehrgerüste: Im unteren Bereich sind dort beidseitig jeweils in zwei Höhenlagen eiserne Tragprofile eingezeichnet. Den derzeitigen Zustand der Bogen kann man der Abbildung 5.21 entnehmen: Die eisernen Profile in den zwei verschiedenen Ebenen kann man bis heute sehen.

Im Allgemeinen, insbesondere bei geraden Brücken, wurden die eisernen Profile durchgeführt und so für beide Bogen verwendet. Eine Verankerung der Stabenden konnte dadurch entfallen. Solche durchlaufenden Profilstähle kann man beim Viadukt von Remersdaal³²⁹ sehen (Abbildung 5.22 und Abbildung 5.23). Dieses wurde im Rahmen der Kriegsbahn Aachen–Montzen–Tongeren während des Ersten Weltkrieges erbaut [Kandler 2008, S. 84–85].

Beim Eisenbahnviadukt (auch Glattalviadukt) im schweizerischen Herisau (1909) sind ebenfalls Herstellungsspuren erkennbar (Abbildung 5.24). Der Vergleich mit einer Abbildung des Lehrgerüsts zeigt, dass sich jeweils auf Höhe der verschiedenen

³²⁶ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü15.

³²⁷ Beschreibung im Katalog unter I21.

³²⁸ Beschreibung im Katalog unter I4.

³²⁹ Beschreibung im Katalog unter I3.

Stockwerke des Gerüsts Eisenteile im Bogen befinden. Auf Kämpferhöhe, also im Auflagerbereich des Lehrgerüsts kann man zugesetzte Öffnungen erkennen. Dies könnte auf die Verwendung hölzerner Auflagerbalken schließen lassen, eine gesicherte Aussage lässt sich mit den vorhandenen Unterlagen aber nicht machen. Dieser Einsatz von ein- oder durchgesteckten hölzernen Auflagerbalken ist bei mittelalterlichen Brücken oft belegbar (Abbildung 5.25),³³⁰ im betrachteten Zeitraum um die Wende zum 20. Jahrhundert konnte dies jedoch nicht als verbreitete Konstruktionsart nachgewiesen werden.

Eine Sonderform der frei gesprengten Gerüste stellen die Fachwerkträger dar (Abbildung 5.26). Aufgrund der schwierigen Ausführung und der verhältnismäßig großen Verformungen wurden Fachwerkträger nur vereinzelt verwendet [Schönhöfer 1911, S. 56]. Ein beeindruckendes Beispiel eines freigesprengten Gerüsts mittels eines Fachwerkträgers ist beim Bau des Pont Adolphe über die Pétrusse in Luxemburg verwendet worden.³³¹ Dieses in den Jahren 1900 bis 1903 nach dem Entwurf von Paul Séjourné erstellte Bauwerk mit einer Lichtweite von beinahe 85 m verfügte zur Bauzeit über den bis dahin weitesten Bogen in Massivbauweise [Fr. E. 1902a, S. 522]. Das zur Herstellung verwendete Lehrgerüst ist in der Abbildung 5.27 dargestellt: Der aus Holz konstruierte Fachwerkbogenträger stützte sich dabei auf zwei im Kämpferbereich hergestellte Absätze sowie auf zwei eigens zu diesem Zweck erbaute Mauern. Der Träger wurde im Scheitel durch eine Unterspannung gestützt und der Schub durch Drahtseile aufgenommen [Fr. E. 1902a, S. 538].

Fest unterstützte Gerüste

Die fest unterstützten Gerüste lassen sich wiederum nach dem Grundsystem in Streben- und Ständergerüste einteilen. Streben-Konstruktionen stützen den Bogenkranz über schräg stehende Bauteile. Abbildung 5.28 zeigt die nahezu radial laufenden Streben, die am unteren Ende in die Bogenschwelle einbinden. Wegen dieser charakteristischen Bauteile wurde dieses System auch Radialstrebensystem genannt [Schönhöfer 1911, S. 52–53]. Die radiale Ausrichtung hat den Vorteil, dass die Kräfte aus dem Bogen direkt vom Bauteil aufgenommen werden können. Diese Kräfte werden idealerweise unter der Bogenschwelle in jedem Punkt aufgenommen und auf den Unterbau bzw. das Untergerüst übertragen. Ein Beispiel eines ausgeführten reinen Radialstrebensystems zeigt die Abbildung 5.29 in kleiner Abmessung beim Kanalbau in Holzminden.

Bei größeren Spannweiten oder wenn nicht genügend Unterstützungspunkte zur Verfügung standen, geriet das Radialstrebensystem an seine Grenzen. In Anwendung konnte dann das in Abbildung 5.30 gezeigte Zentralstrebensystem kommen, bei dem die Streben fächerartig von einzelnen, unterstützten Punkten der Bogenschwelle ausgehen. Der Nachteil dieser Konstruktion ist, dass die Streben je nach Neigung nur einen Teil der Lasten aufnehmen können. Die Streben müssen daher immer gut untereinander

³³⁰ Weitere Beispiele, die im Rahmen einer Recherche in Frankreich aufgefunden wurden sind der Pont Valentré, Cahors; Pont Vieux, Montauban usw.

³³¹ Ein anderes, beeindruckendes Beispiel ist der Pont de la Caille, Cruseilles, Frankreich (vgl. [Paris 1928]; dort auch Abbildung des Lehrgerüsts vorhanden; vgl. Fußnote 447). Ein weiteres Beispiel eines eisernen Fachwerkträgers bietet die Augustusbrücke in Dresden (vgl. Abbildung 5.6).

verbunden sein [Schönhöfer 1911, S. 52]. Beim Zusammentreffen mehrerer Streben in einem Punkt ergab sich die bautechnische Schwierigkeit des Anschlusses, deshalb wurden die Fußpunkte der Streben auseinandergezogen angeordnet. In der Praxis wurden Zentralstreben meist mit relativ vielen Unterstützungen ausgeführt. Die Auswertung der Archivalien der Firma Bernhard Liebold in Holzminden ergab, dass ein bedeutender Teil der dort dargestellten Gerüste Zentralstrebensysteme waren. Allerdings ist ebenso auffällig, dass meist lediglich drei Streben auf eine Unterstützung geführt wurden (Abbildung 5.31). Der Nachteil der eingeschränkten Lastaufnahme des in der Systemzeichnung (Abbildung 5.30) gezeigten Zentralstrebensystems wurde dadurch stark vermindert, die Neigung der Streben wirksam begrenzt, andererseits waren wesentlich mehr Stützpunkte notwendig. Die Vorteile des Zentralstrebensystems wurden gemäß Handbuch der Ingenieurwissenschaften in der Einfachheit der Berechnung, der unmittelbaren Unterstützung der Stöße der Kranzhölzer sowie in der Druckbeanspruchung der Hauptbauteile gesehen [Landsberg 1899, S. 241].

Bei den Ständersystemen (Abbildung 5.32) werden die Lasten hauptsächlich über lotrechte Ständer direkt in den Baugrund abgeleitet. Horizontale Lasten werden durch Aussteifungen zwischen den Ständern aufgenommen. Auch wenn gemäß Strukel die Anwendung der Ständergerüste lediglich für flache und niedrige Gewölbe geeignet sei [Strukel 1913, S. 208], so wird diese Aussage durch die Anordnung einer solchen Konstruktion beim Bau der Walnut Lane Bridge in Philadelphia gründlich widerlegt³³² (Abbildung 5.33). Ständersysteme waren durch ihre Regelmäßigkeit und die meist geraden Anschlüsse recht einfach herzustellen, allerdings benötigten sie eine verhältnismäßig hohe Anzahl an Stützpunkten und viel Material [Schäffer, Sonne 1886, S. 277].

Die Wahl des Lehrgerüstsystems lässt sich auf folgende Punkte zusammenfassen: Entscheidend war sicher die Art und die Anzahl der vorhandenen oder der zu schaffenden Stützpunkte. Dazu zählten die gegebenen Randbedingungen wie z. B. das Überbrücken tiefer Schluchten oder Anforderungen zum Freihalten von Profilen im Bogen für den Verkehr. Die Wahl des Materials wurde beeinflusst durch örtliches Holzvorkommen sowie durch wirtschaftliche Überlegungen, insbesondere ist hier die Möglichkeit einer Mehrfachverwendung des Lehrgerüsts zu nennen.³³³

5.1.2 Ausrüstvorrichtungen

Die Methode des Ausrüstens bestand anfänglich aus dem Wegschlagen bzw. Zerstören ganzer Gerüstteile, Beispiele finden sich hier bei Perronets Pont de Neuilly und bei Boistard. Perronet schreibt zum Ausrüstprozess seiner Neuilly-Brücke: „*Die Streben wurden zerstört, das heißt, sie wurden mit Hammer und Meißel zerschlagen, alles innerhalb einer Stunde an allen Bogen gleichzeitig.*“³³⁴ [Perronet 1777, S. 46]. Das Ausrüsten bei der von Louis Charles Boistard gebauten Brücke über den Loing in Nemours wird wie folgt

³³² Lichtweite 71 m, Pfeilhöhe 21,4 m [Fr. E. 1910, S. 26].

³³³ Vgl. Kap. 5.1.4.

³³⁴ Original: „Les étrépillons ont été ruinés, c'est-à-dire, détruits avec le ciseau & le maillet, le tout en moins d'une heure, ce qui s'est fait en même temps à toutes les arches.“

beschrieben: „Die Gerüste wurden dermaßen zusammengedrückt unter der Last, dass man sie zum Ausrüsten mit Axthieben zerschlagen musste.“³³⁵ [Morandière 1891, Tôme 1, S. 291]. Eine ähnliche Methode wird im Handbuch der Baukunde beschrieben: „Man hat auch Klötze (Würfel) von Weichholz unter die Lehrgerüste gestellt, von denen dann allmählich so viel weggehauen wurde, bis sie kippten.“ [Barkhausen 1892, S. 310]. Auf der Abbildung 5.34 ist zu erkennen, dass es beim Wegschlagen sogar zu einer kurzfristigen, kleinen Hebung bzw. einem weiteren Zusammendrücken des Lehrgerüsts kommen kann.

Der Nachteil dieser sehr „urwüchsigen Weise“ [Barkhausen 1892, S. 310] war die ruckartige Bewegung des Bogens. Konnten die frühen Massivbrücken diese Bewegungen noch kompensieren, da der langsam erhärtende Kalk gewisse Bewegungen noch aufnahm, erhöhte die Verwendung von schnell erhärtendem Zement die Rissgefahr noch weiter.³³⁶ Es wurden deshalb Ausrüstmethoden erforderlich, die ein kontrolliertes gleichmäßiges Ablassen des Lehrgerüsts ermöglichten. Die erste Methode, die sich durchsetzte, war die Verwendung von gegenläufigen Keilen, sogenannten Doppelkeilen.

Keile: Die Verwendung von Keilen zum Ausrüsten ist seit langem bekannt, jedoch wurden die Keile ursprünglich weggeschlagen, was einen ähnlichen Effekt wie bei dem vorherbeschriebenen Abschlagen hatte. In den Traktaten zum Ende des 18. Jahrhunderts [siehe beispielhaft Voch 1780, S. 54–57, Wahl 1786, S. 112] werden Keile zwar beschrieben, jedoch ist keine Rede von gleichmäßigem Absenken. Die Keile wurden entweder unter jedem Wölbstein oder unter den Stützpunkten des Lehrgerüsts angebracht.

Erst die Einführung von abgeschnittenen Doppelkeilen machte ein langsames Absenken möglich. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methode liefert das Handbuch der Baukunde [Barkhausen 1892, S. 310]: Es werden zwei Keile gegenläufig unter die Pfosten des Lehrgerüsts gesetzt, dabei ist die Steigung der Keile so zu wählen, dass die Reibung ausreicht, ein selbständiges Gleiten des Lehrgerüsts zu verhindern.³³⁷ Je flacher die Keile hergestellt wurden, desto gleichmäßiger konnte das Ausrüsten erfolgen. Wichtig bei dieser Methode war, dass man die Kopfflächen der Keile mit dem Hammer gut erreichen konnte, entgegen der in Abbildung 5.35 gezeigten Ausführung sollten deshalb die schmalen Enden über die Gegenkeile hinausragen.

Das größte Problem war eine zu hohe Auflast auf den Keilen und die damit verbundene Schwierigkeit, die Keile überhaupt zum Gleiten zu bringen. Durch die Vergrößerung der Gleitflächen und damit die Verringerung der Last pro Fläche sollte dieses Problem minimiert werden, dies führte zur Verwendung einer Variante der Keilmethode mittels verzahnter Träger nach Abbildung 5.36. Während des Bauablaufs wurde durch Verkeilen der Hohlräume ein vorzeitiges Gleiten verhindert. Durch Hammerschläge auf die Stirnfläche des verzahnten Balkens wurde zum Ausrüsten dann der ganze Riegel

³³⁵ Original: „Les cintres avaient été tellement comprimés sous la charge que, pour opérer le décintrement, il a fallu les briser, à coups de hache.“

³³⁶ Vgl. Kap. 6.2.2.

³³⁷ Reibbeiwert 0,3, daraus eine Neigung von 1:3,5 [Barkhausen 1892, S. 310], das entspricht einem Winkel von ca. 16,6°.

zurückgeschoben und auf diese Weise eine Senkung des Gerüstes bewirkt. Die Träger konnten sowohl in Längs- als auch in Querrichtung des Lehrgerüstes angebracht sein.

Die Methode mit den Doppelkeilen bewährte sich in der Praxis, insbesondere bei kleineren Brücken – die Grenze der Anwendung trat bei Brücken großer Spannweite ein: *„Sind aber die Gewölbe von großer Weite, ruhet mithin auf den Keilen ein sehr bedeutendes Gewicht, so verhindert die starke Reibung das Gleiten der Keiflächen und eine Senkung der Lehrbögen ist dann nur mittelst gewaltsamer Beseitigung durch heftige Stöße oder durch Zerstückelung unter Anwendung scharfer Werkzeuge zu ermöglichen. Hierdurch werden aber Erschütterungen herbeigeführt, welche die verderblichsten Einflüsse auf die Gewölbe äußern können.“* [Krancke 1855, S. 247].

Durch die Vergrößerung der Spannweiten im 19. Jahrhundert stieg also auch der Bedarf nach neuen, besseren Methoden für die allmähliche Senkung des Lehrgerüstes. Im Folgenden werden die üblichen Methoden sowie deren Vor- und Nachteile dargestellt.

Schrauben: Der erste, der Schrauben zum Ausrüsten einsetzte war Jules Dupuit. Beim Bau des Pont de Cé im Jahre 1846 wurde anfänglich mittels Keilmethode ausgerüstet [Dupuit 1855]. Bei einem der Bogen allerdings lösten sich mehrere Keile auf einmal und es kam zu einem schlagartigen Absenken des Lehrgerüstes, Risse im Bogen waren die Folge. Daraufhin suchte Dupuit nach einer anderen Möglichkeit der Ausrüstung und baute schließlich Vertikalschrauben ein (Abbildung 5.37). Hierbei handelt es sich um zwei entgegengesetzt drehende Spindeln, die mittels eines mittig sitzenden Ringes gedreht werden können. Diese wurden kurz vor dem Ausrüstungsvorgang neben die Keile gesetzt und verspannt, so dass die Keile herausgenommen werden konnten. Dann wurden die Schrauben zusammengedreht.

Ähnlich wie bei Dupuit ergab sich auch beim Bau der Brücke in Wittenberge im Jahr 1850–1851 die Notwendigkeit einer alternativen Ausrüstmethode. Auch hier wurde der erste Teil der Brücke mittels Keilen ausgerüstet. Dies erwies sich zum einen als sehr aufwendig, zum anderen ergab ein Nivellement aber auch, dass die verschiedenen Bogen während des Ausrüstens verschiedene Höhen hatten [Unruh v., Benda 1854, S. 499]. Die zuständigen Ingenieure bauten daraufhin die Lehrgerüste der folgenden Bogen unter Verwendung von Radialschrauben (= Bogenschrauben), die unmittelbar die Kranzhölzer unterstützten (Abbildung 5.38).

Der Nachteil dieser Methode ist die sehr hohe Anzahl an Schrauben und der damit verbundene erhöhte Arbeitsaufwand beim Ausrüsten. Durch die radiale Ausrichtung der Schrauben besteht zusätzlich die Gefahr, dass diese während des Wölbens schief belastet und dadurch zerstört werden.

Weil sie günstiger und bequemer waren, wurden die Vertikalschrauben gemäß Dupuit gebräuchlicher. Das Problem beim Dupuitschen Prinzip war die Länge – und damit die Instabilität – der Schraubenvorrichtung. Deshalb setzte sich eine Variante der Schraubenverbindungen durch, die in Abbildung 5.39 dargestellt ist. Hierbei handelt es sich um eine Spindel, die in eine Mutter greift.

Bei allen Schraubenmethoden musste während des Baus genau darauf geachtet werden, dass die Schrauben sauber gehalten wurden. Dazu wurden die Schrauben geschmiert und während der Bautätigkeit umwickelt, damit kein Staub eindringen konnte [Wilke 1869, S. 220]. Die Schraubenmethode war allgemein anerkannt und wurde vielfach verwendet. Vorteile waren die gleichmäßige und einfache Handhabung und dass Höhenänderungen in beiden Richtungen möglich waren, „*sei es, um dasselbe bei zu starkem Setzen wieder in die normale Lage zu bringen, sei es, um dasselbe bei zu starkem Lüften ganz niederzulassen.*“ [Wilke 1869, S. 220].

Sandsäcke: Das Verfahren von Louis Alexis Beaudemoulin [Krancke 1855] wurde erstmals beim Bau der Brücken über die Vienne und die Creuse der Eisenbahn Tours–Bordeaux angewandt.³³⁸ Bei diesem Verfahren wird das Lehrgerüst auf Klötze gestellt, die zwecks einfacherer Bearbeitung aus Tannenholz bestehen (Abbildung 5.40). Vor dem Ausrüsten werden neben diese Klötze mit Sand gefüllte Säcke gelegt, welche mit Unterlegkeilen verspannt werden. Die Klötze werden daraufhin so bebeilt, dass am unteren Ende eine Spitze bleibt, diese kleine Fläche drückt sich durch die Auflast zusammen, das Gerüst sinkt minimal ab. Daraufhin wird die Auflagerfläche wieder bebeilt und damit verkleinert, ein erneutes Zusammendrücken findet statt usw. bis das Gerüst ausschließlich auf den Sandsäcken ruht. Dann lässt man den Sand langsam ausrieseln bis zur endgültigen Senkung des Bogens. Diese Methode war funktionell, aber relativ aufwendig.

Eine Variante der Sandsackmethode von Beaudemoulin entwickelte Henri Melchior de Lagrené (Abbildung 5.41). Er verwendete dazu exakt die gleichen Sandsäcke wie Beaudemoulin, sie unterschieden sich lediglich darin, „*dass in deren Mitte ein mit Wasser gefülltes Rohr aus Kautschuk enthalten war.*“³³⁹ [Lagrené 1852, S. 247]. Diese Rohre waren mit Wasserhähnen aus Eibenholz ausgestattet, aus denen das Wasser dann abgelassen werden konnte. Den Grund für diese alternative Ausführung sah Lagrené darin, dass er den Sand für zu wenig fließfähig hielt. Beaudemoulin reagierte auf diese Kritik mit einem Artikel in den *Annales des ponts et chaussées*: „*Diese Schwierigkeit, die Hr. de Lagrené bemängelt – und hierbei noch übertreibt – ist exakt der Grund dafür, dass ich den Sand gewählt habe und die diesem eine garantierte Unfehlbarkeit beschert. Und überhaupt, wie kann dieser Ingenieur so viele Unwägbarkeiten bezüglich der Sandauslässe erkennen? Er hat nie welche eingesetzt.*“³⁴⁰ [Beaudemoulin 1854, S. 209]. Beaudemoulin nannte daraufhin als Vorteile des Sandes die Kosten, das im Vergleich zum Wasser kontrollierbarere Auslassen des Sandes und als wichtigsten Grund, dass man den Vorgang bei Verwendung von Wasser nicht mehr abrechnen könne, falls eine Unterbrechung des Ausrüstvorganges notwendig werde. Er bezweifelte auch, dass die in größerer Anzahl als beim Sand notwendigen Wassersäcke unmöglich gleichzeitig geöffnet werden können. Zudem seien diese mit Wasser gefüllten Säcke empfindlicher gegenüber ungewollten Beeinträchtigungen durch

³³⁸ In einem Artikel von Croizette-Desnoyers 1849 beschrieben, Eröffnung des relevanten Streckenteils 1851, beide existieren noch heute.

³³⁹ Original: „les sacs dont nous nous sommes servi pour cette opération ne diffèrent de ceux employés par MM. Beaudemoulin et Desnoyers qu'en ce que chacun d'eux contient à sa partie centrale un tube en caoutchouc rempli d'eau.“

³⁴⁰ Original: „Cette difficulté que blâme M. de Lagrené, en l'exagérant, est précisément ce qui m'a fait choisir le sable, et ce qui est une garantie d'infailibilité. Au reste, comment cet ingénieur a-t-il pu reconnaître tant d'inconvénients aux ajutages? Il ne les a pas employés.“

Axthiebe der Arbeiter. Mehrtens ergänzte die Gefahr, dass der Kautschukschlauch unter dem großen Druck platzen könne. Bei größeren Spannweiten und dem damit verbundenen größeren Durchmesser des Kautschukschlauches vergrößerte sich diese Gefahr noch. Die von Lagrené vorgeschlagene Alternative, den Sand gänzlich wegzulassen, verwarf Mehrtens [Mehrtens 1873, S. 499]. Die Methode von Lagrené konnte sich in der Praxis nicht durchsetzen.

Lagrené schließt seinen Aufsatz mit der Bemerkung: „Wir beenden diese Notiz indem wir noch die Meinung äußern, dass die übliche Ausrüstungsmethode [mit Keilen, Anm. d. Verf.] für alle Gewölbe aufgegeben werden muss, die auf Grund ihres Pfeilverhältnisses, ihrer Größe oder der Beschaffenheit des Untergrundes in bemerkenswertem Maß empfindlich gegen Setzungen, ungeplante und abrupte Bewegungen oder vielleicht auch unbestimmte Senkungen sind.“³⁴¹ [Lagrené 1852, S. 253]. Der Bedarf an Ausrüstungsmethoden war klar, nach der idealen Methode wurde noch weitergesucht.

Sandtöpfe: Eine Weiterentwicklung der Sandsackmethode stellt die Verwendung von Sandtöpfen nach Beaudemoulin dar [Beaudemoulin 1854, S. 213]. Die Säcke sollten durch starke Blechzylinder ersetzt werden, die am unteren Ende einen Auslass für den Sand hatten (Abbildung 5.42). Mit dieser Methode mussten die Sandtöpfe bereits beim Aufbau des Lehrgerüsts unter die Stützpunkte gestellt werden. Die Stützen kamen hierbei auf hölzernen Stempeln zu stehen, die wiederum im Zylinder standen. Dadurch sparte man sich die Arbeiten mit dem nachträglichen Einbringen der Sandsäcke, dem Auskeilen, dem Bebeilen und Wegschaffen der Klötze. Anfänglich hatte Beaudemoulin aber praktische Bedenken: Durch den Einbau der Töpfe vor dem Bau der Brücke waren diese mehrere Monate der Witterung, eventuellen Überschwemmungen usw. ausgesetzt, dadurch könne der Sand seine Rieselfähigkeit verlieren. Zudem befürchtete er, dass sich der Sand gegen die Zylinderwände abstütze und dadurch zusammenklebe, Hohlräume bilde und immer wieder stoßweise Senkungen des Gerüsts stattfinden. Er befürwortete daher die Methoden, die den Sand sofort nach dessen Trocknung verwendeten, nicht erst Monate später [Beaudemoulin 1854, S. 213–214].

Dennoch setzte Beaudemoulin die Sandtöpfe bei mehreren Brückenbauten in Paris ein (Austerlitz-, Invaliden-, Almabrücke) [Beaudemoulin 1857, S. 223]. Die Bedenken seien zwar begründet gewesen, jedoch sei man trotzdem immer zum Ziel gelangt [Beaudemoulin 1858, S. 654]. Dabei habe man während der Bauzeit wiederholt mit dem Hammer gegen die Zylinder geschlagen und damit den Sand wieder gelockert oder man habe mit einem Haken den Sand gelöst. Ein unerwarteter anderer Nachteil trat aber ein, nachdem sich bei der Alma-Brücke die Widerlager deutlich gesetzt haben. Die Höhe der Zylinder war dann nicht mehr ausreichend, sie mussten aufwendig ersetzt werden. Trotzdem war Beaudemoulin überzeugt von der Sandtopfmethode und empfahl sie unter Verwendung einiger Verbesserungen: die Abdichtung des Zylinders gegen Feuchtigkeitseindrang und die Möglichkeit der zusätzlichen Anbringung von Sandsäcken –

³⁴¹ Original: „Nous terminons cette notice en exprimant l'opinion que le mode ordinaire de décentrement doit être abandonné pour toutes les voûtes qui, par leur surbaissement, leur grandeur ou la nature du sol sur lequel elles reposent, sont susceptibles de tasser d'une manière notable, et d'éprouver alors des mouvements irréguliers et brusques, ou peut-être même de s'affaisser indéfiniment.“

dabei würde dann der Beginn durch die Sandtöpfe gemacht bis sich das Lehrgerüst auf die Sandsäcke gelegt habe und dann mit den Sandsäcken fortgefahren.

Die Sandtöpfe waren die Methode mit dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis, weswegen sie sich letztlich insbesondere bei größeren Brücken durchsetzen konnten: „Für die Ausschaltung sind Sandtöpfe wegen ihrer Stabilität und leichten Handhabung am meisten zu empfehlen, zumal ein Heben des Gerüsts bei guter Ausführung nicht erforderlich wird.“ [Leibbrand 1906b, S. 279].

Der Vollständigkeit halber sollen nachfolgend noch zwei außergewöhnliche Ausrüstungsmethoden beschrieben werden, die allerdings beide für die Praxis nur wenig Relevanz erlangten: das System Pluyette und die Excentriks.

System Pluyette: Dieses System wurde beim Bau der Brücke über die Marne in Nogent-sur-Marne angewendet. Während des Baus ruhten die Stützen des Lehrgerüsts auf Klötzen. Zum Ausrüsten wurden diese Klötze jeweils durch die in Abbildung 5.43 dargestellte Vorrichtung ersetzt. Die Stütze des Gerüsts wird auf eine Rolle aufgesetzt, die wiederum auf einer spiralförmigen Bahn sitzt. Die Rolle ist anfangs noch durch einen Keil gesichert, um ein unkontrolliertes Rollen zu vermeiden. Zum Ausrüsten werden dann die Keile entfernt, Stangen in die Aussparungen „u“ eingesetzt und die Unterplatte mit der Spiralbahn gedreht. Dadurch sinkt das Lehrgerüst ab. Nach Meinung Pluyettes sei diese Methode einfach einzusetzen und zu bedienen und „wir denken, dass die anwendenden Ingenieure sie für gut befinden werden.“³⁴² [N. N. 1856, S. 315].

Excentriks: Eine außergewöhnliche Form der Ausrüstung entwickelte Otto Intze für den Bau der St.-Annen-Brücke in Hamburg [Intze 1870]. Durch den Einfluss von Ebbe und Flut wurde das Lehrgerüst regelmäßig den hohen Wasserständen ausgesetzt, was die Ausrüstung mittels Sand ausschloss. Zudem gab es die Notwendigkeit des schnellen Ausrüstens während des Niedrigwasserstandes in etwa einer Stunde. Diese Randbedingungen wurden nach Meinung Intzes von keiner der bisher besprochenen Methoden erfüllt. Intze entwickelte daraufhin eine eigene Methode mittels sogenannter Excentriks. Dazu wurden die Ständer des Lehrgerüsts auf spezielle Bauteile – die Excentriks – gestellt, diese waren während der Bauzeit mittels eines Bolzens gesichert. Zum Ausrüsten wurden dann die Sicherungsbolzen entfernt. Dem oberen Teil des Lehrgerüsts wurde mittels der Schrauben S (Abbildung 5.44) eine Horizontalbewegung zugefügt, wodurch die Last des Lehrgerüsts über die Pfosten außermittig auf die ovalen Ringe der Excentriks eingeleitet wurde, die daraufhin abollten. Dadurch senkte sich das Lehrgerüst. Soweit bekannt wurde dieses Verfahren nur ein einziges Mal angewandt. Hauptproblem war die Haftung des Mörtels am Brückenbogen: Nach einer Beschreibung zum Bau der St.-Annen-Brücke musste das Lehrgerüst 18 cm in horizontaler Richtung bewegt werden, bis diese Haftung schlagartig überwunden wurde. Nach derselben Beschreibung haben jedoch lediglich vier Arbeiter in zehn Minuten die Ausrüstung vollzogen. Der Autor setzt sogar hinzu, dass bei mehr Routine ein Ausrüsten in zwei Minuten möglich gewesen wäre [Schäffer, Sonne 1880, S. 249–250]. Die Excentriks-

³⁴² Original: „l'appareil est facile à mettre en place et à manoeuvrer, et nous pensons que les ingénieurs qui l'appliqueront s'en trouveront bien.“

Methode konnte sich aus genannten Gründen in der Praxis nicht durchsetzen: „*Besondere praktische Bedeutung kann der Methode der Excentriks nicht beigemessen werden, da die Schwierigkeit, alle Excentriks in gleicher Höhe zu postiren und besonders die den theoretischen Anforderungen widersprechende anfängliche horizontale Bewegung der Lehrgerüstconstruction dagegen sprechen.*“ [Schäffer, Sonne 1880, S. 249–250].

Die hin und wieder noch genannte *Methode Guyot* besteht lediglich aus einer Kombination von Vertikalschrauben und Sandtöpfen und bietet technisch keine Neuerung. Der Gedanke war, die Sandtöpfe mit Hilfe der Schrauben erst zum Ausrüsten einsetzen zu müssen.

Zusammenfassend lässt sich für den Brückenbau zum Ende des 19. Jahrhunderts sagen, dass Keile für sehr kleine Brücken und für größere Spannweiten die Sandtöpfe üblich waren, „*welche in den letzten 10 Jahren eine so grosse Verbreitung gefunden haben, dass sie wohl als das bei Brücken über 10 m Weite jetzt ziemlich allgemein übliche Mittel zum Ausrüsten bezeichnet werden können.*“ [Barkhausen 1892, S. 312]. Nach dem Handbuch der Ingenieurwissenschaften gebe man den Sandtöpfen „*als dem bequemsten, billigsten und genügend sicheren Ausrüstungsmittel*“ den Vorzug [Landsberg 1899, S. 293]. Dazu kamen noch die Schraubenmethoden (Abbildung 5.45). Verwendet wurden vorwiegend Vertikalschrauben, die Bogenschrauben wurden zwar technisch als das beste Mittel beschrieben, deren Anwendung jedoch als „*kostspielig und unbequem*“ [Landsberg 1899, S. 293]. Zum Anfang des 20. Jahrhundert kam noch ein weiteres Verfahren hinzu, das im Folgenden beschriebene Expansionsverfahren.

*Expansionsverfahren:*³⁴³ Das Expansionsverfahren ist das einzige der hier beschriebenen Verfahren, das nicht auf dem Absenken des Lehrgerüsts, sondern vielmehr auf dem Heben des Bogens basiert. Entwickelt wurde es von Eugène Freyssinet, der es erstmals 1907 bei der Brücke in Prairéal sur Besbre anwandte [Fernández Ordóñez 2012, S. 32]. Bei diesem Verfahren werden im Scheitel Pressen eingesetzt und verspannt (Abbildung 5.46 a–d). Durch den Druck hebt sich der Bogen wenige Zentimeter vom Lehrgerüst ab, das Lehrgerüst kann dann herausgenommen werden. Die Hohlräume zwischen den Pressen werden gefüllt. Nach dem Entfernen der Pressen werden die verbliebenen Hohlräume mit Beton ausgestampft bzw. in Einzelfällen wurden hier Gelenke eingesetzt.³⁴⁴

Das Expansionsverfahren wurde insbesondere auch eingesetzt, wenn unerwartete Senkungen des Scheitels nach der Fertigstellung der Brücke eintraten und der Scheitel wieder gehoben werden sollte. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die Brücke von Le Veudre von Freyssinet,³⁴⁵ aber auch in Deutschland wurde dieses Verfahren genutzt.³⁴⁶ Ein weiterer Vorteil dieses Verfahrens ist, dass das Gerüst nicht durch Ausrüstungsvorrichtungen – wie z. B. Sandtöpfe – geschwächt wird. Freyssinet sagte selbst: „*Der Einsatz des Expansionsverfahrens und der damit verbundene Wegfall der*

³⁴³ Vgl. auch Kap. 7.5.9.

³⁴⁴ Eiserne Gelenke bei der Brücke in Prairéal-sur-Besbre [Fernández Ordóñez 2012, S. 32].

³⁴⁵ Vgl. z. B. [Fernández Ordóñez 2012, S. 43–49].

³⁴⁶ Erstmals bei der Puppenbrücke Lübeck ca. 1914, vgl. [Färber 1916, S. 25] und [Emperger 1932, S. 276–277].

*Sandtöpfe haben mir eine drastische Stabilisierung der Gerüste und deren Stützen erlaubt, bei deutlicher Erhöhung des Kippwiderstandes und unter gleichzeitiger Verkleinerung des Strömungshindernisses im Fluss.*³⁴⁷ [Freyssinet 1949, S. 54].

5.1.3 Schalung

Die Schalung bildet den oberen Abschluss des Lehrgerüsts, der direkt am Gewölbe anliegt. Daraus ergeben sich die an sie gestellten Anforderungen: Die Schalung muss die aufgebrachte Last aus Materialien und Bauablauf sicher auf das darunterliegende Lehrgerüst leiten. Dabei darf sie zwischen den Stützpunkten nicht durchhängen. Sie muss vielmehr den Verlauf der geplanten Bogenform gewährleisten. Weiter muss die Schalung bei der Verwendung von Beton über eine gewisse Dichtigkeit verfügen, damit das Material nicht durchfließen kann. Ein sehr wichtiger Punkt war darüber hinaus die Wirtschaftlichkeit: Dazu zählte ein kostengünstiges Material ebenso wie Handhabbarkeit sowie das einfache Entfernen beim Ausrüsten. Dabei sollte sich eine saubere Untersicht ergeben, um auch den Aufwand für einen nachträglichen Verputz einzusparen.

Die Schalung wurde in einem weit überwiegenden Teil der Brückenbauten konventionell mit Holzdielen bewerkstelligt. Einen Sonderfall bietet die Erdschalung: Dort wird das Gewölbe auf einem tragenden, der gewünschten Form angepassten Erdkörper erstellt. Sie übernimmt über die angesprochenen Anforderungen hinausgehend auch die statischen Aufgaben des Lehrgerüsts und vereinigt damit Formgebung, Tragwirkung und Oberflächenausbildung in einer Konstruktion. Lediglich als Ausnahme kann die Schalung mit Tonfliesen gewertet werden. Diese wurde bereits im Kapitel 4.2 beschrieben. Konventionelle und Erdschalung werden im Folgenden dargestellt.

Konventionelle Schalung

Die grundsätzliche Diskussion bei Schalungssystemen über die vorteilhaftere Anwendung von Holz oder Eisen als Hauptmaterial entspringt zunächst noch dem Bau von aufgehenden Wänden. Dort wurde mehrfach die Verwendung von eisernen Schalungen propagiert, da mit diesen schneller und präziser gearbeitet werden konnte, das Material im Gegensatz zu Holz mehrfach verwendbar war und sich nicht verwarf [Haanen 1872, S. 296].³⁴⁸ Beim Bau von Bogenbrücken sah dies jedoch anders aus: Für jeden Bogenverlauf, also abhängig von Radien und Spannweiten, wäre die Herstellung einer speziellen Schalung notwendig geworden. Dies hätte den Vorteil der Wiederverwertbarkeit stark eingeschränkt und die Kosten steigen lassen. Aus diesem Grund wurde bei Brückenbogen mit kostengünstigeren hölzernen Schalungen gearbeitet.

³⁴⁷ Original: „L’emploi des vérins de décintrement, en supprimant les boîtes de sable, me permettait une solidarisation énérgique des cintres et de leurs supports, augmentant largement leur résistance au renversement, tout en réduisant l’obstacle apporté à l’écoulement des eaux.“

³⁴⁸ Auch Bernhard Liebold sprach sich für die Schalungen aus Eisen oder aus einer Mischung aus Holz und Eisen aus: In seinem „Gutachten über Béton-Bauten im Hochbau“ schreibt er über die eisernen bzw. gemischten Konstruktionen, die Möglichkeit hölzerner Schalungen erwähnt er nicht einmal [Liebold 1880, S. 38]. Interessant erscheint dies vor dem Hintergrund, dass er nur wenige Jahre zuvor in seinem Buch die hölzernen Schalungskästen sogar noch vorzog [Liebold 1875, S. 60–61].

Diese bestanden aus Kanthölzern, Brettern, Bohlen oder Latten, die bei Mauerwerk mit Abständen verlegt wurden (Abbildung 5.47): bei Ziegelgewölben mit etwa 2 cm, bei Bruchstein 4–10 cm und bei Quadergewölben 10–15 cm [Strukel 1913, S. 203]. Die Stärke der Schalung war abhängig vom Abstand der Lehrbogen und von der Belastung.

Eine weitere sehr wichtige Funktion der Schalung, die in dieser Form zwar genutzt, aber kaum beschrieben wurde, ist die Verstärkung des Längsverbandes zwischen den Bindern des Lehrgerüsts. Im Handbuch der Ingenieurwissenschaften ist dies jedoch ausdrücklich genannt: Die Oberfläche des Lehrgerüsts erhalte durch die Schalung einen Längenverband. Dieser bezwecke zudem neben der Sicherung gegen Umkippen der einzelnen Binder auch, dass einzelne Lehrbogen sich nicht mehr senken können als andere [Barkhausen 1892, S. 309].

Bei Betongewölben wurden im Unterschied zu den Bogen aus Mauerwerk die Schalhölzer dicht an dicht verlegt (Abbildung 5.33) bzw. mit kleinen Abständen von 3 bis 5 mm, um auf das Quellen des Materials beim Betonieren Rücksicht zu nehmen [Strukel 1913, S. 203].³⁴⁹ In derselben Abbildung 5.33 ist noch eine weitere Vorrichtung zu erkennen: Die hölzernen Latten und die darübergelegten dünnen Bretter bilden die Lehre für den Bogenrücken. Die Abbildung 5.33 ist damit eines der ganz seltenen Zeugnisse aus dieser Phase des Bauablaufs. Die genaue Ausführung der Bogenrückenlinie sowie deren ständige Überprüfung waren insbesondere dann wichtig, wenn der Bogen in der Ansichtsfläche sichtbar war. Eine flexible Vorrichtung mit gleicher Funktion wurde 1889 im Centralblatt der Bauverwaltung beschrieben [Km. 1889, S. 493–494]. Dafür sei eine hölzerne Lehre mit der entsprechenden Rundung auf Bretter genagelt worden, die in ihrer Höhe je nach Lage im Bogen angepasst werden könne [Km. 1889, S. 493–494]. Entgegen der soeben beschriebenen Lehren für den Bogenrücken beschrieb Schönhöfer eine Schalung für die Oberseite des Bogens. Diese werde während des Betonierens angebracht und könne wegen der geringen Belastung sehr schwach ausgeführt werden bzw. gegen den Scheitel hin ganz entfallen [Schönhöfer 1911, S. 61].³⁵⁰

Weitere betonspezifische Probleme im Hinblick auf die Schalung waren das Anhaften des Zementmörtels sowie das Durchsickern des Mörtelwassers. Um hier Verbesserungen zu erreichen, wurden mehrere Vorkehrungen eingeführt.

Zur Vermeidung des Durchsickerns wurden Abdeckungen gebräuchlich. Die Verwendung von festem Papier war wohl die meistverwendete Variante.³⁵¹ Dessen Einführung schrieb

³⁴⁹ Vgl. „Die Lehrgerüste wurden mit dicht aneinander und lose auf den Obergurt der Binder gelegten Bohlen eingeschalt und mit Ziegelsteinen belastet. Bei der Langen Brücke betrug die Bohlenstärke 8 cm; bei der Dammbrücke sollte sie der grösseren Binderweite wegen anfänglich 10 cm betragen, jedoch sind schliesslich 5 cm starke Bohlen in doppelter Lage genommen worden, weil sich dabei leichter eine glatte Leibungsfläche erzielen und dem Kanten der einzelnen Bohlen abhelfen liess.“ [Tolkmitt 1892, S. 362].

³⁵⁰ Siehe hierzu auch das Beispiel der Gerberbachüberwölbung in Kap. 4.3 sowie Abbildung 4.26.

³⁵¹ Beispiele: Lennebrücke Vorwohle mit Makulaturpapier ([Liebold 1877a, S. 259], vgl. Kap. 4.5), Brücke von Bornhöved mit Papier [Dorrien 1886, S. 183–184], Donaubrücke Munderkingen mit Packpapier [Leibbrand 1894, S. 553], Inzigkofen mit Gipsüberzug und zusätzlichem Papier [Leibbrand 1896, S. 289], usw. Reihling nennt in seinem Aufsatz Packpapier mit Leinöl als Ausführungsart der von ihm beschriebenen Betonbrücken [Reihling 1896, S. 60].

Prof. Emil Dietrich E. H. Hoffmann zu [Dietrich 1882, S. 126].³⁵² Anlässlich der Beschreibung zum Bau der Donaubrücke in Rechtenstein erläuterte der zuständige Bauinspektor Paul Braun die Vorgehensweise: Die Gewölbedielen seien mit Rollenpapier bedeckt, das vor dem Betonieren mit Seifenwasser bestrichen worden sei. Nach dem Ausschalen habe man das Papier leicht abbürsten können [Braun 1893, S. 442]. Die innere Laibung habe auf diese Weise eine zwei bis drei Zentimeter starke Zementmörtellage erhalten [Braun 1893, S. 442]. Diese Zementmörtellage war durchaus erwünscht, denn sie gewährleistete eine relativ glatte Untersicht, die einen nachfolgend angebrachten Putz überflüssig werden ließ. Spuren dieser Bautechnik sind bis heute an der Lennebrücke in Vorwohle sichtbar.³⁵³ Als weitere Möglichkeiten wurden Gipsüberzüge oder Auflagen aus Eisen- oder Kupferblechen beschrieben [Büsing 1892, S. 160–161].³⁵⁴ Die beim Bau der Überwölbung des Gerberbaches in Schaffhausen im Jahre 1868 beschriebene Variante, nach der über die Schalung ein Segeltuch gespannt wurde [DMA, Sign. FA 010/266, S. 25], ist wohl als Ausnahme zu werten. Auch dort sei das Segeltuch zur glatten Ausbildung der Untersicht sowie zum Verhindern des Durchsickerns des Mörtels angewendet worden [DMA, Sign. FA 010/266, S. 25].

Um das Anhaften des Zementes an die Schalung oder an die Abdeckung zu verringern, wurden Seifenlösungen oder Öle verwendet, insbesondere grüne Seife³⁵⁵ (= Schmierseife) oder Leinöl [z. B. Krüger 1905, S. 179].³⁵⁶ Lediglich Büsing rät in der dritten Auflage seines Buches neben Schmierseife zu Mineralöl, einem nicht fetten Öl, das den Zement nicht angreife [Büsing 1905, S. 309].

Die bisherigen Betrachtungen beschränkten sich auf die Bogenschalungen. In vielen Belangen ähnlich, aber doch nicht ganz gleich waren die Stirnschalungen zu behandeln. Wie ein gewisser Dorrien im Jahre 1886 berichtete, war die Abdeckung mit Papier an aufgehenden Stirnschalungen nicht anwendbar, *„weil das Papier beim Einstampfen des Betons abgerissen worden wäre und deshalb durch Einschmieren der Bretter mit grüner*

³⁵² Er spricht darüber, dass die Schalungshölzer mit geringem Abstand verlegt werden, um das Ableiten des Regenwassers zu gewährleisten. Allerdings könne dadurch der Mörtel ausfließen: „Herr E. H. Hoffmann beseitigt diesen Uebelstand auf nachahmenswerthe, soweit bekannt sonst nicht gebräuchliche Weise dadurch, daß er die Schaalung dort, wo gerade gewölbt wird, mit gewöhnlichem, leidlich festen Papiere bedecken läßt, welches die Fugen der Schaalbretter an der Arbeitsstelle schließt.“ Zum Zeitpunkt als Dietrich den Artikel schrieb (1882), hatte Liebold die Verwendung von Papier auch bereits beschrieben (vgl. Fußnote 351), die Aussage, dass Hoffmann der einzige Anwender war, war also in jedem Fall falsch. Wer die Verwendung von Papier letztlich eingeführt hat, konnte nicht mehr geklärt werden.

³⁵³ Vgl. Kap. 4.5; Abbildung 4.47 und Abbildung 4.48.

³⁵⁴ Folgende Publikationen nennen ebenso die verschiedenen Möglichkeiten, empfehlen jedoch nicht das Papier: [Mehrrens 1885, S. 518] bevorzugt den Gipsüberzug. Eine undatierte Aussage (zwischen 1877 und 1883) von Dyckerhoff beschreibt: „Auf die Gewölbeverschalung legen wir Blechtafeln und darauf wird vor dem Auflegen des Betons eine Schichte mit einem 5 bis 7 mm Sieb aufgesiebt, damit die Gewölbeunterfläche sauber wird.“ [Deutsches Museum Archiv, Sign. FA 010, Bü 015, S. 432]. [Büsing 1892, 160–161] empfiehlt Eisenblechtafeln, „noch besser Kupfertafeln.“ In der späteren dritten Auflage desselben Buches ist hingegen zu lesen, dass Bleche bei fabrikmäßigen Herstellungen feinerer Art, ansonsten Papier verwendet werde [Büsing 1905, S. 309].

³⁵⁵ Beispiel: „Ehe die Wölbung begann, wurde die Schalung mit einer Abkochung von grüner Seife bestrichen, um eine Verbindung des Cementmörtels mit den rauhen Schalbrettern zu verhindern.“ [Mehrrens 1885, S. 518].

³⁵⁶ Reihling nennt in seinem Aufsatz Packpapier mit Leinöl als Ausführungsart bei Betonbrücken [Reihling 1896, S. 60]; vgl. Fußnote 351.

Seife ersetzt werden musste, um wenigstens das Lösen derselben vom fertigen Mauerwerk zu erleichtern.“ [Dorrien 1886, S. 184]. Jedoch bemängelte Dorrien, dass nach dem Ausschalen zwar die Laibungsfläche vollkommen glatt und beinahe lückenfrei gewesen sei, jedoch die Stirnen und auch die Brüstungen poröse Außenflächen aufgewiesen haben und verputzt werden mussten [Dorrien 1886, S. 184]. Der Vorteil der Zementmörtellage, die sich bei der Gewölbelaibung ergab, war an den Stirnen nicht vorhanden. Deshalb kann man heute an vielen Brücken erkennen, dass die Laibung ohne, die Stirnen jedoch mit Verputz ausgeführt wurden.³⁵⁷ Des Weiteren wurden z. B. Verkleidungen aus Naturstein, nachträglicher Verputz oder in die Schalung eingegebener Feinmörtel sowie Fertigteile verwendet.³⁵⁸ Bei Sichtbetonstirnen war hingegen auf äußerst sorgfältige Ausführung zu achten.

Die Ausbildung der Stirnschalung erfolgte zumeist mit einer vertikalen Holzwand, für deren Befestigung sich zwei grundlegende Varianten durchsetzten: die Absteifung gegen die verlängerte Bogenschalung sowie das gegenseitige Verspannen mit Drahtankern. Die erstgenannte Methode ist in der Abbildung 5.51 dargestellt: Hier ist zu erkennen, dass die Bogenschalung über die geplante Breite des Bogens hinaus verlängert wurde und darauf dann eine schräg eingestellte Steife die Oberkante der Stirnschalung an ihrem Platz hielt. Das Foto in der Abbildung 5.52 zeigt diese Absteifungen bei der Baustelle der Friedensbrücke in Plauen.³⁵⁹

Drahtanker bestehen aus einem quer durch die Schalung gezogenen Draht und „*hatten den Zweck, Ausbauchungen der Schalungen während des Einstampfens des Gewölbebetons zu verhindern.*“ [Leibbrand 1895/96, S. 75]. Eine genaue Beschreibung bzw. Zeichnung dieser Verankerungsmethode ist nicht bekannt. Es finden sich lediglich Hinweise, dass Drahtanker verwendet wurden, jedoch nicht zur genauen Ausführung.³⁶⁰ Aus Befunden an Brücken lässt sich die Verankerung jedoch rekonstruieren: Die Spuren von Drahtankern bestehen jeweils aus zwei in unmittelbarer Nähe auftretenden rostigen Punkten, sichtbar an der Stirnfläche des Bogens (Abbildung 5.54). Man kann also davon ausgehen, dass der Draht durch das Bauteil hindurch in einer Schlaufe verlegt und an einer beliebigen Stelle verwirbelt wurde. Beim Ausschalen wurde der Draht dann an der Betonoberfläche abgeschnitten. In derselben Abbildung 5.54 sind die gleichen Spuren auch im Zwickel feststellbar. Drahtanker waren also nicht auf den Bogen beschränkt, sondern konnten auch an anderen Bauteilen verwendet werden. Dies bestätigt sich auch an den Pfeilern des

³⁵⁷ Z. B. die Eisenbahnbrücke in Seifersdorf (Abbildung 5.49 und Abbildung 5.50; Beschreibung im Katalog unter Sa26) oder Lennebrücke in Vorwohle (vgl. Kap. 4.5 sowie [Liebold 1877a, S. 53]).

³⁵⁸ Zur architektonischen Oberflächengestaltung siehe Kap. 5.3.

³⁵⁹ Vgl. Abbildung 6.25 am Beispiel der Lennebrücke Halden oder die Absteifungen der schiefen Muldebrücke in Schlema/Hartenstein (Abbildung 5.53). Diese Brücke ist erhalten, die Ansicht ist jedoch durch eine übermäßige Sanierung stark beeinträchtigt (Beschreibung im Katalog unter Sa21).

³⁶⁰ Z. B. „Die Schalungen für die Betonierung der Brücke wurden an den Ansichtsflächen aus gehobelten und gespundeten, an den übrigen Fläche aus rauhen Brettern hergestellt und durch Streben nach außen abfangen oder durch Drahtanker verbunden.“ [Bock, Dolezalek 1901, S. 330] und „Die zur Begrenzung der Gewölbestirnen dienende Schalung wird meistens gegen auskragende Schalpfosten oder Pfetten mittels Streben abgestützt und vielfach auch noch durch starke Drähte gegenseitig verhängt.“ [Schönhöfer 1911, S. 61].

Berwinnetalviaduktes³⁶¹ (Abbildung 5.55). Dort sind in regelmäßigen Abständen übereinander wiederum die beiden rostigen Enden des Drahtes sichtbar. Einen schriftlichen Hinweis auf die Verwendung von Drahtankern auch bei Pfeilern ist im Zusammenhang mit der Donaubrücke in Inzigkofen überliefert: Max Leibbrand berichtete dazu, die Pfeiler seien zwischen freistehenden Schalungen, welche mit Drahtankern verbunden waren, betoniert worden [Leibbrand 1896, S. 290].

Welche der beiden Methoden – Absteifung oder Drahtanker – Anwendung fand, lag im Ermessen der ausführenden Firma. Dies lässt sich besonders gut zeigen am Beispiel der Illerbrücken in Kempten: Die beiden dortigen Brücken wurden von den zwei Firmen Kunz und Dyckerhoff & Widmann ausgeführt. Technisch genau gleich weist dennoch die Einzelbrücke Befunde von Drahtankern auf (Abbildung 5.56), während die Doppelbrücke auf beiden Ansichtsflächen keine derartigen Spuren zeigt (Abbildung 6.24) – dort wurden also offensichtlich Absteifungen verwendet.³⁶² Es wurden auch beide Varianten gleichzeitig angewendet, wie es beispielsweise Leibbrand für den Bogen der Inzigkofener Donaubrücke beschreibt [Leibbrand 1895/96, S. 75].

Erdschalung

Karl Held schrieb in seinem 1808 veröffentlichten Werk zum Pisé-Bau, dass es wohl deshalb noch keine zweckmäßige Anwendung für gestampfte Gewölbe gebe, weil die hölzernen Lehrgerüste die Erschütterungen durch das Stampfen nicht aushalten. Noch am ehesten ließe sich ein solches aber bei zu überwölbenden Räumen in der Erde versuchen: *„Man müsste diesen Raum zuvörderst unausgegraben lassen, die Erdoberfläche daselbst nach der zu machenden Wölbung rund abstechen, festschlagen, und sie mit schmalen Brettern überlegen. Rund um könnten dann die Einfassungsmauern von Feldsteinen mit einer Thüröffnung aufgeführt, und dann das Pisée-Gewölbe über die abgerundete Erdfläche geschlagen werden; nachher erst müsste man den Raum von der Seite her, durch die gelassene Thüröffnung ausgraben.“* [Held 1808, S. 52]. Held beschrieb hier recht präzise die Prinzipien der Erdschalung. In Frankreich war diese Bauweise zu Hhelds Zeiten bereits bekannt, wie im Kap. 4.1 anhand der Bauten von Rozier bereits ausführlich beschrieben wurde. Das dort beschriebene, von den Brüdern Lebrun mit Erdschalung erstellte Gewölbe ist der Keller im Rathaus von Gaillac. Dieses ist ein besonders eindrückliches, heute noch bestehendes Beispiel für ein solches Bauwerk. Der heute ungenutzte Keller hat sich die Spuren der Herstellungstechnik bewahrt: Die Oberfläche der aufgehenden Wände im Kellerraum ist auffällig uneben, was auf die Verwendung der Erdschalung (Abbildung 5.57) zurückzuführen ist. Dabei wurde die gewünschte Form in die anstehende Erde modelliert – für die Wände wurden Gräben ausgehoben, ebenso wurde die Krümmung des Bogens im Boden geformt, stark verdichtet und geglättet. Die ausgehobenen Gräben sowie das Gewölbe wurden daraufhin mit Beton gefüllt und durch Stampfen verdichtet. Frei blieben lediglich die Stellen *„zu Licht, Luft und zu der Eingangstreppe“*, über die später der Zugang erfolgen sollte [Lebrun, Crelle 1843, S. 304]. Vier Monate nach der Fertigstellung des gesamten Gewölbes wurde die Erde ausgehoben [Lebrun 1837, S. 63]. Bis heute kann

³⁶¹ Viaduc de Berneau, Belgien. Beschreibung im Katalog unter I1.

³⁶² [Waibel 1904, S. 260] liefert ein Foto der Doppelbrücke aus der Bauzeit und bestätigt die Verwendung von Absteifungen.

man die Spuren der Erdschalung im Keller von Gaillac erkennen: Reste von Erde sowie Kratzspuren von Spitzhacke oder ähnlichem Werkzeug sind auf Abbildung 5.58 deutlich zu erkennen.

In der Literatur finden sich zahlreiche Hinweise auf die Nutzung von Erdschalungen.³⁶³ Kritik gab es diesbezüglich an der angeblich mangelhaften Austrocknung. So beanstandete Friedrich Krause, der sich um die Verwendung des Kalk-Sand-Pisé verdient gemacht hatte:³⁶⁴ „Dagegen kann die mehrfach empfohlene Methode, die Kellergewölbe auf die nach der vorgeschriebenen Gewölbeline gebildete Erdunterlage zu stampfen, und die Erde dann erst später auszugraben, nicht gebilligt werden, weil auf diese Weise die Erhärtung der Masse nicht nur verzögert wird, sondern auch ungleichmäßig erfolgt.“ [Krause 1851, S. 73]. Diese Kritik ist jedoch wohl hauptsächlich bei Verwendung von nicht hydraulischen Bindemitteln begründet. Auch wenn die Anwendung von Erdschalungen sicherlich nicht die Regel war, ergaben sich bei geeigneten Randbedingungen Vorteile. Das Handbuch der Ingenieurwissenschaften erläuterte, dass falls für die geplante Brücke ein Einschnitt ausgebildet werden müsse und insbesondere dann, wenn eine neben der Brücke liegende Straße durch die Bauzeit hindurch aufrechterhalten werden solle, bei ausreichender Festigkeit des anstehenden Bodens auf die Erdschalung zurückgegriffen werden könne [Schäffer, Sonne 1880, S. 250].

5.1.4 Rationalisierung bei der Konstruktion von Lehrgerüsten

„Je billiger die Ausführung des Lehrgerüstes wird, um so mehr kann man auch zur Herstellung weit gespannter Bögen übergehen, weshalb die Verminderung der Gewölbstärke indirekt auch zur Wahl weiter gespannter Bögen und zur Verminderung der Anzahl der Mittelpfeiler bei langen Brücken führt.“ [Dietrich 1882, S. 94].

Der Fortschritt im Bogenbrückenbau hängt eng zusammen mit der Verringerung der Kosten für das Lehrgerüst. Um die Jahrhundertwende sind hier mehrere Phänomene erkennbar, die zwar zumindest teilweise vorher bekannt waren, zu diesem Zeitpunkt aber vermehrt angewendet wurden.

1. Einsparung von Kosten durch die mehrfache Verwendung von Lehrgerüsten bei verschiedenen Brücken:

Die mehrfache Verwendung von Lehrgerüsten insbesondere bei Viaduktbauten mit einer Vielzahl an gleichen Öffnungen war eine bereits lange praktizierte Methode, Lehrgerüstkosten zu verringern.³⁶⁵ Am Anfang des 20. Jahrhunderts lassen sich darüber hinaus auch mehrere Beispiele nachweisen, bei denen Lehrgerüstkonstruktionen für verschiedene Brücken wiederverwendet wurden.

³⁶³ Z. B. [Prochnow 1848, S. 22–23]; [Mihálik 1858, S. 180]; [Coignet 1859, S. 13]; [Dejardin 1860, S. 246–247] bis hin zu einer 19 m weiten Brücke [N. N. 1878]; [Strukel 1913, Tafel 38]; [Schäffer, Sonne 1880, S. 250–252] beschreibt mehrere Beispiele.

³⁶⁴ Vgl. Kap. 3.2.2.

³⁶⁵ Vgl. z. B. [Unruh v., Benda 1854] u. v. m.

Beispielweise ist vom Bau der Brücken im Münchner Brückenbauprogramm³⁶⁶ überliefert, dass Lehrgerüste mehrfach verwendet wurden. Die ausführende Firma Sager & Woerner schrieb zum Bau der Max-Joseph-Brücke: „*Das bei der Luitpoldbrücke verwandte Lehrgerüst (...) wurde nach der neuen Isarbrücke verbracht, der neuen, wenig veränderten Bogenform angepaßt und zum zweiten Male verwandt. Ebenso konnte das ganze Rüstzeug für die Versetzarbeiten (...) ohne weiteres in Verwendung genommen werden.*“ [Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. (1925), S. 30]. Ebenso wurden beim Bau der Wittelsbacherbrücke die Lehrgerüste der benachbarten Reichenbachbrücke verwendet – beide Brücken wurden mit gleichen Abmessungen, aber unterschiedlicher architektonischer Ausgestaltung geplant [Lucks 1976, S. 505; S. 508]. Die mehrfache Verwendung der Baustelleneinrichtung einschließlich der Gerüste senkte die Kosten für die Bauten des Brückenbauprogramms. Dies war letztlich ein ausschlaggebender Grund für die Vergabe als Gesamtpaket an die ausführende Firma [Rädlinger 2008, S. 145].

Ein weiteres Beispiel, bei dem sich die Mehrfachnutzung der Lehrgerüste zumindest in Teilen vermuten lässt, sind die von Bernhard Liebold gebauten großen Moselbrücken aus Stampfbeton. Im Stadtarchiv Holzminden sind Beschreibungen der folgenden Bauwerke über die Mosel erhalten: Brücken bei Mehring (1904–1905, vier Hauptöffnungen, Abbildung 5.59), bei Schweich (1905–1906, drei Hauptöffnungen, Abbildung 5.60), bei Trittenheim (1907–1908, drei Hauptöffnungen, Abbildung 5.61), bei Longuich (1911–1912, eine Hauptöffnung, Abbildung 5.62) und bei Piesport (1912–1913, zwei Hauptöffnungen, Abbildung 5.63) [u. a. StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].³⁶⁷ Sie hatten allesamt gelenklose Bogen. Gemäß den genannten Beschreibungen wiesen die Hauptöffnungen der erstgenannten Brücken jeweils eine Lichtweite von 46 m bei einem Stich von 6,17 m auf. Die Scheitelstärke betrug jeweils 1 m. Bei den Nebenöffnungen konnte kein einheitliches Schema ausgemacht werden. Lediglich die Brücke bei Piesport hatte mit ihren beiden 49 m weiten Hauptöffnungen abweichende Abmessungen. Die genaue Betrachtung der genannten Abbildungen (Abbildung 5.59 bis Abbildung 5.63) zeigt eine große Ähnlichkeit der verwendeten Gerüste. Unterschiede zeigen sich lediglich in den Schiffahrtsöffnungen³⁶⁸ und minimal auch im Unterbau. Ein weiteres Indiz für die Mehrfachverwendung zeigt die Abbildung 5.64: Dort besagt die Überschrift, dass das

³⁶⁶ Das Münchner Brückenbauprogramm: Nach einem verheerenden Hochwasser im September 1899, bei dem einige der vorhandenen eisernen und hölzernen Brücken zerstört worden waren, wurden die betroffenen Isarbrücken nur in Form von Notbrücken wiederaufgebaut. Diese wurden dann nach und nach durch Gewölbebrücken ersetzt, beginnend mit der Prinzregentenbrücke (auch Luitpoldbrücke, 1900–1901; Beschreibung im Katalog unter BY16), dann die Max-Joseph-Brücke (1901–1902, vgl. z. B. [Kling 1902]; Beschreibung im Katalog unter BY17), die Corneliusbrücke (1901–1903), die Reichenbachbrücke (1902–1903; Beschreibung im Katalog unter BY13), die Maximiliansbrücke (1903–1905; Beschreibung im Katalog unter BY15) sowie die Wittelsbacherbrücke (1904–1905; Beschreibung im Katalog unter BY12). Außerdem wurden in den Jahren 1901–1904 Teile der Isarregulierung innerhalb der Stadt sowie die Ufermauern und Böschungssicherungen hergestellt. Sämtliche Arbeiten wurden von der Firma Sager und Woerner ausgeführt [Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. (1925), o. S.]. Detaillierte Informationen z. B. in [Lucks 1976]; [Rädlinger 2008]; [Rädlinger 2012].

³⁶⁷ Keine der genannten Brücken ist heute noch vorhanden.

³⁶⁸ Vgl. dazu auch [Schönhöfer 1911, S. 68–69; S. 90–91]: Dort werden die Gerüste der Brücken in Mehring und Schweich besprochen. Während Mehring eine dreieckförmige Durchfahrt zeigt, wurden in Schweich Howe-Träger zur Überbrückung der Durchfahrt verwendet.

Lehrgerüst mit Schifffahrtsöffnung gezeigt werde und nennt dabei die Brücken in Schweich und Trittenheim³⁶⁹ [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].³⁷⁰

Noch einen Schritt weiter ging die Bayerische Staatseisenbahn-Verwaltung. Der unbekannte Autor „H.“ beschrieb die Vorgehensweise zum Ersatz zahlreicher schienengleicher Wegübergänge durch gewölbte Brücken so, dass soweit die Bedingungen es gestatteten nach zwei Musterplänen gearbeitet worden sei [H. 1898a, S. 575]. Diese „Mustertypen“³⁷¹ wiesen einen Hauptbogen auf, der bei größeren Abmessungen noch um zwei Nebenbogen ergänzt wurde (Abbildung 5.65). Die Form des Brückenbogens weiche jedoch bei beiden Typen lediglich so geringfügig ab, dass für beide Musteröffnungen *„das gleiche Lehrgerüst dienen kann“* [H. 1898a, S. 575]. Um die häufige Anwendung dieser Lehrgerüste zu ermöglichen, wurden diese in Eisen hergestellt.³⁷² Es seien sechs solcher Gerüste beschafft worden. Da hierdurch die Kosten der Gerüstarbeiten beträchtlich abgemindert werden konnten, seien gelegentlich auch Brücken außerhalb der Eisenbahnanlagen in dieser Form erstellt worden [H. 1898a, S. 575].

2. Einsparung von Kosten durch die mehrfache Verwendung von Lehrgerüsten bei derselben Brücke:

Das gleiche Ziel – nämlich die Einsparung von Gerüstkosten – verfolgt die Ausführung von Brückenbogen in Streifen. Dabei wird das Gewölbe in Längsrichtung aufgeteilt. Diese Streifen werden nacheinander mit demselben Lehrgerüst ausgeführt. Dadurch verfügt dieses über wesentlich weniger Gespärre. Einen Hinweis darauf findet sich beispielsweise bei Max Leibbrand: *„Von größter Bedeutung für die Verminderung der Kosten der Lehrgerüste ist aber die Teilung der Brückengewölbe parallel zur Gewölbestirne, so daß das Lehrgerüst nur für einen Teil der Gewölbbeite hergestellt werden muß und dann mehrfach verwendet werden kann“* [Leibbrand 1906c, S. 464].³⁷³ Der Vorschlag wurde E. H. Hoffmann zugeschrieben, so ist in einer Mitschrift eines Vortrags vom königlichen Baurat Krone, Berlin, zu lesen: *„Hoffmann geht nun mit seinen Vorschlägen zur Verbilligung der Lehrgerüste für gewölbte Brücken noch weiter und empfiehlt, die Bögen auch der Länge nach in einzelne Theilbögen zu zerlegen, sodass man für jedes Brückengewölbe von beliebiger Länge (Brückentiefe) nur einen Gleitbogen als Lehrgerüst nöthig hat.“* [Krone 1899, S. 270]. Weiterhin behauptete Hoffmann, dass 80 nebeneinander gesetzte Teilbogen von je 12,5 cm Breite genau dasselbe leisten wie ein durchgehender Bogen von 10 m

³⁶⁹ Wobei das Foto von Trittenheim einen Howe-Träger als Schifffahrtsöffnung zeigt. Verfasserin geht davon aus, dass die Bildüberschrift fehlerhaft ist und Schweich und Mehring gemeint waren.

³⁷⁰ Ein weiteres Beispiel sind die Illerbrücken in Kempten. Dort wurde das Lehrgerüst für alle drei Brücken verwendet [Colberg 1906, S. 220].

³⁷¹ Melan bezeichnet diese Brücken demnach auch als „Typen der königl. bayr. Staatsbahnen“ [Melan 1911, S. 276].

³⁷² Leibbrand spricht von einer „grossen Zahl Brücken ähnlicher Art, welche die Königl. Bayerische Staatseisenbahn-Verwaltung als Ersatz für abgängige Holzbrücken zu erbauen hat“. Dabei „werden mit Vorteil eiserne Lehrgerüste verwendet.“ [Leibbrand 1897b, S. 55].

³⁷³ Z. B. auch bei der Donaubrücke Ehingen/Berg: Dort wurde das Gewölbe in zwei Streifen gebaut, deshalb wurden nur drei Gespärre für das Lehrgerüst benötigt [Braun 1901, S. 522]. Weiter [Landsberg 1904, S. 333]. Die seltene Verwendung dieser Methode bemängelt Karl von Leibbrand: „Auch die Ausführung der Brücken in einzelnen nebeneinander liegenden Abschnitten behufs der Ersparnis an Lehrgerüstkosten wird nur sehr selten angetroffen.“ [Leibbrand 1897b, S. 80].

Breite. Auch seien die dadurch entstehenden Längsfugen nicht schädlicher als die bei einem zusammenhängend betonierten Gewölbe festgestellten Formänderungen [Krone 1899, S. 270].³⁷⁴

Diese Methode hatte allerdings auch Nachteile, denn die Ausführung in mehreren Streifen bedingte das mehrfache Warten bis zum Ausrüsten des Teilgewölbes.³⁷⁵ So beschrieb Krone in seiner eben erwähnten Abhandlung, das Verfahren sei im Hinblick auf die Bauzeit bedenklich, denn wenn man jedem Teilbogen nach dessen Fertigstellung nur drei Tage Zeit ließe, entstünde in dem genannten Beispiel eine zusätzliche Wartezeit von 240 Tagen [Krone 1899, S. 270]. Vorteile sah er lediglich beim Umbau bestehender hölzerner oder eiserner Brücken, da hier der Bau der Brücke erfolgen könne, ohne den Verkehr nachhaltig zu stören [Krone 1899, S. 270]. Ausgeführte Beispiele sind etwa die Hammerkanalbrücke in Esslingen³⁷⁶ oder die Rosensteinbrücke in Stuttgart-Bad Cannstatt.³⁷⁷

Ein weiterer Vorschlag wird E. H. Hoffmann zugeschrieben: die Aufteilung des Gewölbes in einzelne voneinander unabhängige Bogen mit dazwischen gespannten Kappen [Landsberg 1899, S. 170].³⁷⁸ Diese Ausführungsweise birgt ein zweifaches Kosteneinsparungspotential – bei der Ausbildung des Lehrgerüsts wie auch beim Material für den Bogen. In den Jahren 1900 bis 1903 baute Paul Séjourné in Luxemburg den Pont Adolphe über das Pétrussetal.³⁷⁹ Die tragende Konstruktion mit einer Lichtweite von fast 85 m wurde aufgelöst in zwei Bogen mit 5,3 m Breite im Scheitel, die im Abstand von 6 m hergestellt wurden. Die Fahrbahntafel wurde als Eisenbetonplatte ausgeführt. Auf diese Weise sei neben den Gerüstkosten fast ein Drittel der Materialmenge erspart worden [Fr. E. 1902a, S. 522].³⁸⁰

³⁷⁴ Krone misstraute diese Aussage allerdings: „Ich muss gestehen, dass ich vorläufig die Richtigkeit dieser letzteren Behauptung bezweifele, bis ich durch vergleichende Versuche davon überzeugt worden bin.“ [Krone 1899, S. 270].

³⁷⁵ Vgl. beispielsweise die Beschreibung von der Munderkinger Donaubrücke, die ursprünglich aus Kostengründen bei Wiederverwendung der Gerüsthölzer in zwei Hälften gewölbt werden sollte. Wegen der Kürze der Bauzeit wurde jedoch hiervon abgesehen [Gugenhan 1894, S. 494].

³⁷⁶ Vgl. Kap. 7.7; Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü7.

³⁷⁷ Die Aufteilung in zwei Streifen wird im Katalog unter Ba-Wü21 kurz beschrieben.

³⁷⁸ Ob dies wirklich zutreffend ist, mag bezweifelt werden. Bereits Winkler schreibt in seiner Monographie, der französische Ingenieur Boucher habe vorgeschlagen, die Bogen voneinander zu entfernen und die Zwischenräume mit Platten zu überdecken. Winkler beschreibt dies allerdings im Zusammenhang mit schiefen Brücken, bei welchen die Problematik eine andere ist als bei geraden. Nebenbei bemerkt Winkler allerdings, dieser Vorschlag sei wohl auch bereits für gerade Brücken gemacht worden. Einen weiteren Nachweis für diese Aussage nennt er jedoch nicht [Winkler 1874, S. 12]. Die Anwendung der aufgelösten Gewölbe hat sich jedoch wohl erst mit Séjournés Pétrusse-Brücke verstärkt wieder ins Bewusstsein gerückt: „(...) es dürfte ein Verdienst Séjournés sein, von neuem die Aufmerksamkeit auf eine Bauweise gelenkt zu haben, die bei grösseren Gewölben gewichtige Vortheile bietet, sowohl durch die Ersparniss an Mauerwerk als auch durch die Möglichkeit, dasselbe Lehrgerüst hintereinander für mehrere Bögen zu verwenden.“ [Degener 1902, S. 463].

³⁷⁹ Vgl. [Degener 1902]; [Fr. E. 1902a]; [S. 1902].

³⁸⁰ Weitere Beispiele für die Auflösung: die Walnut Lane Bridge in Philadelphia [Fr. E. 1910; Abbildung 5.66] sowie die Rocky River Bridge bei Cleveland, Ohio [N. N. 1909]; [Emperger 1911, S. 518–521] usw.

5.2 Herstellung des Betons

Da zur Herstellung von Beton häufig lokal vorkommende Materialien verwendet wurden, mussten diese vor Ort verarbeitet werden. Die Vorbereitung von Sand und Schotter beinhaltete insbesondere das Brechen, Sieben und Waschen. Grundsätzlich sind bei allen genannten Aufgabenstellungen sowohl manuelle Arbeitsweisen als auch der Einsatz von Maschinen möglich.³⁸¹ Abhängig war die Wahl der geeigneten Methode in erster Linie von der Menge des herzustellenden Betons.

Wichtiger für die Qualität des Betons war jedoch das Mischen. Auch hier ist grundsätzlich zwischen Hand- und Maschinenmischung zu unterscheiden. Ziel war bei beiden Methoden die vollständige und gleichmäßige Vermengung der einzelnen Bestandteile des Betons, also Zement, Sand, Wasser und Schotter bzw. Kies.

Die Vor- und Nachteile von Maschinen- und Handmischung beschreibt Friedrich Wilhelm Büsing insbesondere in der vierten Auflage seiner Monographie *„Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen“* [Büsing 1912]. Dabei sei mit maschineller Mischung eine gleichmäßigere und höhere Qualität des Betons³⁸² sowie eine höhere Mischleistung zu erreichen. Darüber hinaus sei die Maschinenmischung dann vorzuziehen, wenn beengte Platzverhältnisse eine Handmischung nicht erlauben sowie geeignete Arbeitskräfte fehlen oder nur schwer untergebracht werden können [Büsing 1912, S. 370–371]. Bei der Handmischung hingegen könne der Arbeitsfortschritt jederzeit überwacht und an die Anforderungen wie auch an unerwartete Stockungen des Arbeitsablaufes angepasst werden. Auch sei es einfacher, den Mischplatz bei fortschreitender Verwendungsstelle zu verlegen [Büsing 1912, S. 371–372].

Den Vorgang des Handmischens beschrieb Edmund van Haanen im Jahr 1872: Hierzu werde eine hölzerne Plattform erstellt (Abbildung 5.67). *„Auf dieses Brett wird ein Massgefäß gestellt, welches nur vier Seiten hat und unten und oben offen ist. In dieses Gefäß wird das zu mengende Material in dem bestimmten Mischungsverhältnisse eingefüllt, dann das Massgefäß abgehoben und gewöhnlich durch drei Arbeiter die Mischung selbst vorgenommen. Hierbei wird das Material zweimal in trockenem Zustande mittelst Krücken über das Mischbrett gezogen und vermengt, dann mit einer grobbausigen Kanne begossen und abermals gemischt. Die Mengung soll unmittelbar nach der Verarbeitung verwendet werden (...).“* [Haanen 1872, S. 296]. Nach jedem Mischvorgang musste die Mischpritsche gereinigt werden, damit beim nächsten Mischvorgang keine bereits abgebundenen Mörtelbrocken in den Beton gelangen konnten [Dyckerhoff & Widmann AG 1888, S. 3].

Zumindest bei Bedarf an größeren Mengen Betons wurden Maschinen eingesetzt. Ein Vorläufer der Mörtel- und Betonmaschinen waren Fallwerke, bei denen ein Schacht von mind. 2,5 m Höhe mit schiefen Ebenen ausgestattet war (Abbildung 5.68). Die Bestandteile wurden auf der obersten Ebene im gewünschten Mischungsverhältnis aufgebracht und

³⁸¹ Eine sehr ausführliche Betrachtung zur Herstellung der Materialien für Mörtel und Beton sowie zum Mischen der Bestandteile liefern die verschiedenen Auflagen der Monographie *„Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen“* [Büsing 1892]; [Büsing 1899]; [Büsing 1905], insbesondere jedoch die 4. Auflage [Büsing 1912, S. 340–401]. Vgl. auch [Kopka 1871].

³⁸² Höhere Festigkeit sowie geringere Neigung zu Schwindrissen [Büsing 1912, S. 370].

durch Öffnen dieser Ebene in den Schacht befördert. Dort sollten sich die Bestandteile dann beim Hinunterrutschen vermischen. Die Nachteile dieser Methode waren insbesondere die schlechte Qualität der Mischung sowie der notwendige Höhenunterschied, da die einzelnen Bestandteile auf die Fallhöhe transportiert werden mussten. Sinnvoll eingesetzt werden konnte das Fallwerk also nur bei tiefen Baugruben, die die Fallhöhe bereits naturgemäß aufwiesen. Die schlechte Qualität der Mischung ist auf die verschiedenen Dichten und Formen der Bestandteile zurückzuführen, die uneinheitliche Fall- bzw. Gleiteigenschaften nach sich ziehen. Mit Fallwerken gemischter Beton musste deshalb immer nochmals durchgearbeitet werden, um eine angemessene Qualität zu erreichen. Sie konnten sich deshalb nicht durchsetzen [Büsing 1912, S. 374–377].

Grundsätzlich ist bei den Mischmaschinen zwischen satzweisem und kontinuierlichem Betrieb zu unterscheiden. Die soeben beschriebenen Fallwerke sind ein Beispiel für die satzweise Herstellung von Beton. Kontinuierlich arbeitende Maschinen konnten größere Mengen produzieren, hatten jedoch die Schwierigkeit der gleichbleibenden Qualität, da nur bei sorgfältigster Beschickung in gleichbleibendem Verhältnis der einzelnen Bestandteile ein einheitlicher Beton erstellt werden konnte [Büsing 1912, S. 380]. Weiterhin konnte bei kontinuierlich arbeitenden Maschinen weniger auf etwaige Stockungen im Bauablauf reagiert werden. Durchsetzen konnten sich daher die satzweise arbeitenden Mischer. Hier konnten sowohl die Mischungsverhältnisse als auch die Mischzeiten auf die jeweiligen Anforderungen genau abgestimmt werden [Büsing 1912, S. 380]. Ein Nachteil dieser Methode ist lediglich der Zeitverlust durch das Stillstehen der Maschine beim Entleeren und Beschicken zwischen den einzelnen Mischvorgängen [Büsing 1912, S. 380].

Ob nun die Mischung per Hand oder maschinell vorgezogen wurde, wurde bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts nicht eindeutig entschieden. Sowohl die Randbedingungen als auch die persönlichen Ansichten der Verantwortlichen begründeten die Entscheidung.³⁸³ Anton Hoch merkte in einem Vortrag von 1904 noch an, dass wohl in 90 von 100 Fällen noch mit der Hand gemischt werde [Hoch 1904b, S. 1463]. Erst in der vierten Auflage seiner Monographie beschreibt Büsing erstmals die eindeutige Vormachtstellung der Maschinenmischung: *„In neuerer Zeit hat sich aber durch die großen Fortschritte der Maschinen-Industrie einerseits und besonders auch mit Rücksicht auf möglichste Unabhängigkeit von der Menschenarbeit ein so ausgesprochener Umschwung zugunsten der Maschinenmischung vollzogen, daß man, abgesehen von ganz kleinen Ausführungen, wohl von einem Überwiegen der Maschinenmischung sprechen kann.“* [Büsing 1912, S. 371–372].

Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Qualität des Betons war der Transport von der Mischstelle zum Verwendungsort. Der Beton sollte möglichst umgehend nach der Mischung eingebaut werden.³⁸⁴ Dabei war darauf zu achten, dass sich die einzelnen

³⁸³ Vgl. beispielsweise die Aussage Büsings in der dritten Auflage 1905 zur Frage, ob Hand- oder Maschinenarbeit zu bevorzugen sei, dass lediglich die höhere Festigkeit des Betons eindeutig für die Maschinenmischung spreche. „Im übrigen wird unter Berücksichtigung der besonderen Aufgaben, der Verhältnisse der Baustelle und anderer Faktoren von Fall zu Fall die Entscheidung zu treffen sein.“ [Büsing 1905, S. 269].

³⁸⁴ Eine Diskussion zur maximalen Liegezeit von Beton findet sich in [Büsing 1912, S. 403–404].

Bestandteile weder beim Transport noch beim Einbringen wieder entmischen, eine möglichst erschütterungsarme Beförderung war daher notwendig [Büsing 1912, S. 402]. Nach Auswertung des Fotoarchivs der Firma Liebold in Holzminden ergaben sich grundsätzlich zu unterscheidende Lagen der Versorgungsbrücken: Am häufigsten zu finden³⁸⁵ ist die mittig auf dem Lehrgerüst bzw. dem Bogen aufgelagerte Bahn (Abbildung 5.69; Abbildung 5.70).³⁸⁶ Diese Lage hatte insbesondere während der Herstellung des Bogens den Nachteil, dass die Stützen des Versorgungsgerüsts im Weg waren. Um diesen Mangel zu beheben, konnte die Versorgungsbahn auch mittig über dem Bogen auf einer Art Portalrahmen angebracht werden (Abbildung 5.71; Abbildung 5.72; Abbildung 5.73). Dadurch wurde aber die Fallhöhe des Materials entsprechend groß, was insbesondere beim Einsatz von Beton problematisch sein konnte. Diese Schwäche konnte durch die Verwendung seitlich liegender Transportwege ausgeglichen werden (Abbildung 5.74; Abbildung 5.75). Abbildung 5.76 zeigt die kombinierte Anwendung von mittig und seitlich liegender Versorgungsbahn.

5.3 Betonieren

Der Beton wurde in Schichten eingebracht und mittels Stampfern verdichtet; nur durch diesen Arbeitsgang erhielt der Beton Festigkeit und Dichtigkeit.³⁸⁷ Dabei hing die Schichthöhe von mehreren Faktoren ab. Büsing berichtete, größere Stärken seien billiger und bedingen weniger Trennflächen, hingegen wirke das Stampfen nur bis in eine gewisse Tiefe im Material [Büsing 1892, S. 135]. Weiterhin war sie abhängig vom Feuchtegehalt des Materials: Erdfeuchter Beton erforderte eine Schichthöhe von maximal 15 bis 20 cm, während weicher Beton bis 30 cm stark eingebracht werden konnte [Büsing 1905, S. 301]. Die Schichthöhe wurde anfangs vom Unternehmer nach seinem Erachten gewählt. Dementsprechend formulierte Büsing in der ersten Auflage seiner Monographie die Empfehlung für eine angemessene Schichtdicke noch sehr vage: „*Man wird danach annehmen können, dass etwa 20–25 cm eine passende Schichthöhe sein werden.*“ [Büsing 1892, S. 136].

Diese Schichten wurden dann mit Stampfern festgestoßen. Das Stampfen des Betons musste sofort nach dem Einbringen des Materials beginnen [Büsing 1905, S. 301]. Die Dauer des Stampfens hing im Wesentlichen vom Feuchtegehalt des Betons sowie der zu erreichenden Festigkeit ab: Bei erdfeuchtem Beton sollte so lange gestampft werden, bis eine weitere Verdichtung nicht mehr stattfindet, die Masse elastisch wird oder Wasser an der Oberfläche austritt. Bei weicherem Beton konnte zu langes Stampfen zum Entmischen der Bestandteile führen [Büsing 1905, S. 301–302]. Zum Stampfen wurden hölzerne oder eiserne, mit Stielen versehene Stößel verwendet (Abbildung 5.77, Abbildung 5.78 und Abbildung 5.79). Diese verfügten in der Regel über quadratische oder rechteckige

³⁸⁵ Diese Aussage gilt nur für die Firma Liebold, andere Firmen mögen das abweichend gehandhabt haben.

³⁸⁶ Vgl. auch die weiter oben behandelten Moselbrücken in Trittenheim, Longuich und Schweich (Abbildung 5.61, Abbildung 5.62 sowie Abbildung 5.64).

³⁸⁷ Vgl. z. B. das Zitat von Mihálik: „Nur durch fleissiges Stampfen jeder einzelnen Bétonlage, die nie höher als 2–3“ aufgeschüttet werden darf, wird die Bétonmasse dicht und zu einem festen Stein. (...) Das Stampfen hat den Zweck, zu bewirken, dass alle constituierenden Theile des Bétons vollkommen aneinander hängen, in welchem Zustande die Masse gleichartig und unzusammendrückbar wird.“ [Mihálik 1858, S. 144].

Grundflächen von 10 bis 16 cm Kantenlänge und ein Gewicht von 10 bis 17 kg.³⁸⁸ Die Stampfergröße hing von der Größe der Bauteile sowie von der erwünschten Festigkeit ab [Büsing 1905, S. 302]. Die Kanten der Stampfer sollten abgerundet sein, um beim Stampfen keine Grate im Beton zu erhalten. Aus demselben Grund sollten sich die Stampfflächen überdecken [Büsing 1905, S. 303].

Besonders sorgfältig musste dabei an Ecken und Kanten vorgegangen werden, da dort die höchste Anforderung an die Dichtigkeit bestand, hier jedoch andererseits das Stampfen größere Schwierigkeiten bereitete als in der Fläche. In einem Artikel über den Bau einer Brücke mit Tragwerk und Brüstungen aus Stampfbeton berichtete deren Erbauer im Jahr 1886 über die Schwierigkeiten des Stampfens. Die Betonschichten seien mit einer Stärke von rund 30 cm eingebracht und mit hölzernen Rammen gestampft worden, bis Wasser an der Oberfläche austrat [Dorrien 1886, S. 184]. Nach Fertigstellung des Bauwerks sei festgestellt worden, dass sowohl die Außenflächen als auch die Brüstungen nicht ausreichend dicht gestampft worden seien. Es sei dies zum einen auf mangelnde Sorgfalt zum anderen aber auch auf die Tatsache zurückzuführen, dass kleinere Bauteile nur mit Schwierigkeiten ausreichend gestampft werden können [Dorrien 1886, S. 185]. Dies liege daran, dass sich insbesondere scharfkantige Zuschläge an der Schalung festklemmen und dadurch den Mörtel an der Ausbreitung hindern. Ein weiterer Grund sei, dass unwillkürlich in der Mitte eines Bauteils mehr gestampft werde als an den Rändern, da der Arbeitsgang dort schwieriger sei [Dorrien 1886, S. 185]. Um sämtliche Bauteilgrößen und auch Ränder und Ecken sauber stampfen zu können, empfahl Büsing, „auf der Baustelle verschiedene Stampfer zu verschiedenen Zwecken vorrätig zu halten.“ [Büsing 1905, S. 303]. Die Abbildung 5.80 zeigt verschiedene Sonderarten von Stampfern insbesondere für den Einsatz an Ecken, Rundungen und Kanten.³⁸⁹

Zum Stampfen mit Maschinen wurden zwar Versuche angestellt,³⁹⁰ diese jedoch aufgrund der schwierigen Randbedingungen nicht flächendeckend eingesetzt.³⁹¹ Büsing beschrieb beispielsweise eine beim Bau des Freihafens in Bremen eingesetzte Stampfmaschine. Diese habe sich jedoch nur deshalb gelohnt, da es sich um eine „sehr umfangreiche Ausführung“ gehandelt habe und lediglich Füllbeton gestampft werden musste [Büsing 1905, S. 303]. Eine verbreitete Nutzung von Maschinen ist auszuschließen: „Es ist nicht bekannt geworden, daß auch bei höher beanspruchten Stampfbetonbauten irgend wo die Maschinen- anstelle der Menschenkraft getreten sei.“ [Büsing 1905, S. 303]. Erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde mit der Einführung von Pressluftstampfern eine Alternative zur Handarbeit ermöglicht: Diese waren von einem Arbeiter zu bedienen und selbst an Stellen einsetzbar, die per Hand nur schwer bearbeitbar waren. Dagegen waren sie teuer

³⁸⁸ Der in Abbildung 5.78 dargestellte eiserne Stampfer stammt vermutlich aus dem frühen 20. Jahrhundert. Er hat eine quadratische Grundfläche mit 15 cm Kantenlänge und wiegt dabei 6,5 kg (einschließlich Holzstiel und Betonanhaftungen).

³⁸⁹ Mihálik's Beschreibung dazu lautete: „Beim Stampfen der Ecken sowohl, als der an die Rundung sich anschließenden Körper, sind ausser den Stösseln, Fig. 58 u. 59, auch noch jene Fig. 70, nöthig.“ [Mihálik 1858, S. 157].

³⁹⁰ Vgl. etwa die Stampframme von Rödlich im Kap. 3.2.2 [Rödlich 1829].

³⁹¹ Außer bei Herstellung von kleineren Betonbauteilen im Werk (z. B. Betonprobewürfel [Büsing 1912, S. 408]).

in der Anschaffung und insbesondere beim Einsatz auf der Baustelle schadensanfällig, besser geeignet waren sie für eine Verwendung im Betonwerk [Büsing 1912, S. 408].³⁹²

Um einen guten Verbund zwischen den Stampfschichten zu erhalten, sollte möglichst frisch auf frisch betoniert werden, das heißt, dass die Folgeschicht auf den noch unabgebundenen Beton aufgebracht wird. Vor dem Aufbringen einer neuen Schicht musste die bereits fertiggestellte mit Stahlbesen aufgeraut werden. Bei längerer Unterbrechung sollte die Betonoberfläche zusätzlich mit einem dünnen Zementbrei eingeschlämmt werden [Büsing 1905, S. 302].³⁹³ Dennoch konnte sich zwischen den Schichten in der Trennlinie eine gewisse Schwachstelle ergeben. Um die Auswirkungen zu verringern, ergab sich die Forderung, die Schichten senkrecht zu den im Bauteil herrschenden Druckkräften auszubilden. Dadurch wurden die Stampffugen und damit die Schwachstellen im Material überdrückt [Büsing 1905, S. 302].

Das Stampfen senkrecht zur Krafrichtung war jedoch nicht immer umsetzbar. Insbesondere bei Herstellung von Brückengewölben ergaben sich im Scheitelbereich oder bei flachen Bogen Schwierigkeiten. Der Ingenieur der Leinebrücke in Grasdorf A. Bock beschrieb diese wie folgt: *„Man hört häufig die Forderung aussprechen, der Beton müsse in Richtung der Drucklinie gestampft werden. Jedoch ganz abgesehen davon, dass ein solcher Vorgang sehr oft unausführbar ist, wie z. B. bei Herstellung eines flachen Brückengewölbes, sollte es auch nach unserer Meinung möglichst vermieden werden, die abzustampfenden Flächen zu sehr gegen die Wagerechte zu neigen. Es wird hierdurch die Stampfarbeit sehr erschwert und in Folge dessen die so überaus wichtige Verdichtung des Betons nur mangelhaft erreicht.“* [Bock, Dolezalek 1901, S. 326]. Abbildung 5.81 aus der Monographie von Armand Mahiels zeigt die Ausbildung eines Bogens durch zwei Arbeiter: Einer stampft von oben auf den Beton, der andere muss bei fortlaufender Arbeit beinahe waagrecht stampfen. Wenngleich Mahiels diese Ausführungsweise empfiehlt [Mahiels 1893, S. 125], so ist dennoch eine gute Verdichtung hier nicht gewährleistet. Als Lösung ergaben sich zwei Möglichkeiten: die Neigung der Stampflinien sowie die Ausbildung von Absätzen.

Das Neigen der Stampffugen beinhaltete das radiale Anordnen der Fugen bis dies baupraktisch nicht mehr möglich war. Dann wurde die Neigung um 90° gedreht. Hierzu wurden im Kämpferbereich die Stampffugen noch radial ausgerichtet und damit senkrecht zum Druck. Ab einer gewissen Höhe änderte sich diese Ausrichtung in tangentiale

³⁹² Vgl. den Bau der Rosensteinbrücke in Stuttgart-Bad Cannstatt. Dort wurden Pressluftstampfer verwendet. Heinrich Spangenberg, der verantwortliche Ingenieur, hatte bereits beim vorangegangenen Bau der Donaubrücke in Ulm vergleichende Versuche mit Hand- und Pressluftstampfern durchgeführt. Er fand dabei heraus, dass die maschinelle Verdichtung um etwa 30 % höhere Festigkeiten ergab. Weitere Vorzüge seien, dass eine höhere Tagesleistung erreicht werde und dass weniger Arbeiter benötigt werden, was insbesondere bei engen Baugruben zu berücksichtigen sei. Aus wirtschaftlicher Sicht seien jedoch solche Pressluftanlagen nur für Massenbeton zu empfehlen. Beim Brückenbau haben sich keine Einsparungen ergeben [Spangenberg 1914, S. 84].

³⁹³ Vgl. auch Mihálik: Die Schichtenbildung könne unterbunden werden, „wenn Unterbrechungen in der Arbeit wo möglich vermieden werden.“ [Mihálik 1858, S. 144]. Bei kurzer Unterbrechung unter drei Stunden genüge es, die betonierete Oberfläche aufzukratzen. Bei längerer Unterbrechung über drei Stunden müsse die Oberfläche aufgehackt und mit Mörtel oder Beton eingerieben werden, bevor die nächste Schicht aufgebracht werde [Mihálik 1858, S. 145].

Stampffugen und damit gleichgerichtet mit den Druckkräften.³⁹⁴ Ein ausgeführtes Bauwerk, bei dem man diese Ausführung in nahezu idealer Weise sehen kann, ist die Eisenbahnbrücke über die Alz in Garching, Bayern (Abbildung 5.82).³⁹⁵ In den beiden Hauptbogen kann man erkennen, dass sich die Stampffugen im Kämpferbereich bis zu den Gelenklöcken der Laibung folgend neigen bis sie einen gewissen Winkel erreicht haben. Dann dreht sich die Ausrichtung der Stampffugen um 90° und die folgenden Abschnitte weisen zur Laibung parallel laufende Stampflinien auf.

Druckversuche, die von Büsing beschrieben wurden, ergaben, dass an Probewürfeln die Festigkeiten parallel oder senkrecht zur Stampfrichtung nahezu gleich waren. Daraus resultierend empfahl Büsing radiale oder tangentialen mit schräger Lage vorzuziehen [Büsing 1905, S. 302]. Wenngleich sich diese Ansicht durchsetzte und in den einschlägigen Quellen so beschrieben wird, sind zahlreiche Brücken dennoch mit davon abweichender, insbesondere waagrecht ausgerichtet der Stampffugen ausgeführt worden. Als Beispiele hierzu sind etwa die Illerbrücken in Kempten (Abbildung 6.24) sowie in Lautrach³⁹⁶ (Abbildung 8.47) zu nennen: Dort sind im Bogen horizontalen Fugen zu erkennen. Diese waren im Vergleich zu geneigten Fugen einfacher herzustellen. *„Das Stampfen muß mit Kraft und Gleichmäßigkeit erfolgen, da hiervon die Festigkeit des Betons wesentlich abhängig ist. Es hat senkrecht zu geschehen, um nicht der Schwerkraft entgegenzuwirken.“* [Leibbrand 1906c, S. 464].³⁹⁷

Die zweite Möglichkeit, die Auswirkungen von Trennlinien im Beton zu vermindern, war die Ausbildung von Absätzen. Büsing beschrieb den Gedankengang hinter dieser Bauweise, dass die schädlichen Folgen einer Schichtgrenze umso beträchtlicher seien, je größer die Ausdehnung der Fläche sei. *„Hieraus folgt, dass es zweckmässig ist, die Schichten nicht in grosser Ausdehnung zu bilden, vielmehr häufig Absätze einzulegen, wodurch die Kontinuität der Sonderungsfläche unterbrochen wird.“* [Büsing 1892, S. 136]. Außerdem empfehle sich das Einlegen von Absätzen, wenn bis zum Aufbringen der nächsten Schicht eine Arbeitspause entstehe, während derer der Beton bereits erhärtet und in der Oberfläche Risse entstehen oder Verschmutzungen auftreten können [Büsing 1892, S. 136]. Wie diese Absätze genau aussahen, erläuterte Büsing nicht. In Bocks Artikel zur Leinebrücke in Grasdorf wurde die Ausbildung etwas genauer beschrieben: *„Falls stark geneigte Begrenzungsflächen (...) durch den Verlauf der Drucklinie erforderlich werden, damit kein Abschieben stattfinden kann, ist es zweckmässig, dieselben in folgender Weise mit Hilfe von Schalungen treppenförmig herzustellen.“* [Bock, Dolezalek 1901, S. 326; Abbildung 5.83]. Allerdings stellte Bock diese Absätze lediglich im Widerlager her.

³⁹⁴ Z. B.: „Man wird das Gewölbe am besten senkrecht zur Fuge stampfen, doch ist dies nur am Kämpfer, aber nicht am Scheitel möglich, so daß meist ein Stampfen in radialer Richtung eintreten muß.“ [Melan 1903–1904, S. 169].

³⁹⁵ Weitere Beispiele Rottachbrücke in Kempten-Rothkreuz (Beschreibung im Katalog unter BY8), die Rottachbrücke in Ahegg (Beschreibung im Katalog unter BY6) sowie der Igelsbachviadukt der Wieslaufalbahn (Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü28).

³⁹⁶ Vgl. Kap. 8.4.

³⁹⁷ Vgl. hierzu beispielsweise auch die Aussage des Belgiers Mahiels. Er empfiehlt horizontale Schichten. Die Sorge, dass dabei Abplatzungen am Intrados des Bogens auftreten, hielt er für unbegründet [Mahiels 1893, S. 124–125].

Das einzige der Verfasserin bekannte Objekt, bei dem treppenförmige Absätze an der Oberfläche sichtbar sind, ist der von Dyckerhoff & Widmann ausgeführte Teufelsgrabenaquädukt in Grub von 1890 (Abbildung 5.84). Dyckerhoff beschrieb die Ausführung von Absätzen zwar, jedoch nicht im Zusammenhang mit Brücken, sondern beim Bau von Behälterwänden.³⁹⁸

Die Ausbildung von Absätzen konnte sich nicht durchsetzen. In den vom Deutschen Beton-Verein aufgestellten „Leitsätze[n, Erg. d. Verf.] für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Bauten aus Stampfbeton“ aus dem Jahre 1905 wird die Fugenausbildung zu Gunsten der Fugenneigung geregelt: Die Schichten sollen, wo es die Bauausführung gestatte, rechtwinklig zu der auftretenden Druckrichtung eingelegt werden und wo dies nicht möglich sei gleichlaufend [Deutscher Beton-Verein 1905, S. 14]. Auch die zuvor besprochenen Aspekte des Stampfens wurden hier in einer klareren Regelung zusammengefasst: Die Dicke der fertig gestampften Schichten dürfe bei erdfeuchtem Stampfbeton je nach Beanspruchung 15–20 cm nicht überschreiten. Dabei ergebe eine geringere Schichtdicke eine höhere Festigkeit. Die Schichten müssen in der Regel frisch auf frisch verarbeitet werden, um den Verbund untereinander zu gewährleisten. Die Oberfläche sei vor Aufbringen der nächsten Schicht aufzurauen [Deutscher Beton-Verein 1905, S. 12–14]. Die Leitsätze fanden direkten Eingang in die ersten Normen für Stampfbeton, die als „Allgemeine Bestimmungen für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Bauten aus Stampfbeton“ vom 1907 gegründeten Deutschen Ausschuss für Eisenbeton aufgestellt wurden [Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1908].

In den Anfangsjahren des Betonbrückenbaus war die Ausbildung der Oberflächen noch geprägt von der Ästhetik der Mauerwerksbrücken. Da der Anblick des Materials Beton noch ungewohnt war,³⁹⁹ wurden die meisten Brücken so ausgebildet, dass die Ansicht des Bauwerks eine Ausführung aus Werkstein vortäuschte.⁴⁰⁰ Hierzu gab es diverse Ausführungsmöglichkeiten. Die Verkleidung mit Stein war dabei zwar naheliegend,⁴⁰¹ aufgrund verschiedener Eigenschaften von Stein und Beton jedoch schadensanfällig [z. B. Beutel 1903; 1904, S. 3]. Aus demselben Grund war auch ein Verputz nicht wünschenswert. Max Leibbrand erwähnte diese Sachlage im Jahre 1906: „*Ein Vorsetzen von Quadern wird nur noch selten angewendet, ist auch wegen der verschiedenen Elastizität der Quadern und des Betons nicht empfehlenswert. Nachträglicher Verputz ist ganz ausgeschlossen. Solcher fällt mit der Zeit ab. Lieber lässt man die Ansicht ganz in natürlichem Zustande, doch sollten die geringen Kosten, der Ansicht ein gutes Aussehen zu geben, nicht gespart werden.*“ [Leibbrand 1906c, S. 464]. Um die Oberflächen ansprechender zu gestalten, gab es mehrere Möglichkeiten: Neben der steinmetzmäßigen Bearbeitung wurden Fugenschnitte nachgebildet sowie Verkleidungen aus Beton angebracht, wobei teilweise auch mehrere Arten kombiniert ausgeführt wurden.

³⁹⁸ „(...) wird an den jeweiligen Enden die Betonwand terrassenförmig in Höhen von 30 bis 50 cm, bei etwa 15 cm Breite abgesetzt, damit der Anschluss (...) in mehreren Lagen überbindet.“ [Dyckerhoff & Widmann AG 1888, S. 5].

³⁹⁹ Vgl. beispielsweise: „Bei der Fertigstellung der Brücke wurde versucht, dem Bauwerk das sonst Betonbauten eigene unerfreuliche Aussehen zu benehmen.“ [Leibbrand 1894, S. 553] oder „Weil reine Betonflächen nach aussen unansehnlich wirken“ [Landsberg 1899, S. 287].

⁴⁰⁰ Vgl. Kap. 7.3.

⁴⁰¹ Z. B. [Janensch 1895, S. 398].

Die Nachbildung des Fugenschnittes erfolgte mit auf die Schalung aufgenagelten Leisten (Abbildung 5.85). Karl von Leibbrand beschrieb dies im Rahmen des Baus der Munderkinger Brücke wie folgt: „(...) hierauf sind kleine trapezförmige Leisten aufgenagelt worden, um der inneren Leibung eine Theilung nach der Richtung des englischen Fugenschnitts zu geben.“ [Leibbrand 1894, S. 553]. Solche Ausführungen sind auch an den Bogenzwickeln zahlreicher Betonbrücken angewendet worden (Abbildung 5.86).⁴⁰² Auf derselben Abbildung ist eine weitere übliche Art der Oberflächenausbildung erkennbar: die steinmetzmäßige Nachbearbeitung. In diesem Fall sind die Flächen gestockt und die Ränder scharriert.

Die Oberflächen mit steinmetzmäßiger Ausbildung wurden zumeist mit einer besonderen Betonmischung ausgeführt, die feinere Zuschläge beinhaltete und oft eingefärbt wurde. Dieser Feinbeton wurde zusammen mit dem Gewölbebeton eingebracht, vgl. hierzu etwa das Zitat von Max Leibbrand: „Die Gewölbestirnen werden durch Vorgeben einer besonderen Betonmischung mit feinem Pochmaterial gleichzeitig mit dem Kern der Gewölbe eingestampft und nachher vom Steinhauer bearbeitet.“ [Leibbrand 1906c, S. 464]. Diese Vorgehensweise – Vorsetzen von Feinbeton und nachträgliche Bearbeitung – wird wiederholt beschrieben und zählt sicherlich zu den Standardbauweisen. Das Ziel dabei war, Natursteinoberflächen zu imitieren. Die Nachbearbeitung lediglich durch Auswaschen wird am Beispiel der Eyachbrücke Imnau⁴⁰³ beschrieben. Sämtliche Ansichtsflächen seien hier in Granitnachbildung ausgeführt. Dazu habe man zusammen mit dem Gewölbebeton einen Feinbeton mit einer Stärke bis zu 10 cm an den Stirnen eingebracht. „Längstens binnen 12 Stunden nach dem Einstampfen wurden die dabei benutzten Lehren entfernt und die Flächen mit Wasser und Bürste abgerieben, wodurch der Cement an der Aussenhaut entfernt und ein granitähnliches, poriges Gefüge an den Sichtflächen erzeugt wurde. Die Granitnachbildung ist als sehr gelungen zu bezeichnen und wirkt vollkommen täuschend derart, dass die Grenze zwischen natürlichem und künstlichem Granit nur schwer erkennbar ist.“ [Leibbrand 1898, S. 190]. Auch bei der Friedensbrücke in Plauen ist bekannt, dass Granit nachgebildet werden sollte. Dazu wurde in die Stirnschalung eine Schablone eingebracht, die die Quaderfugen imitierte. Beim Bau wurde dazu eine ca. 7 cm dicke Mörtelschicht direkt gegen diese Schablonen angeworfen, die sofortige Anarbeitung des anstehenden Bruchstein-Zementmörtel-Mauerwerks stellte den guten Verbund zwischen Zementschale und Hintermauerung sicher. Nach der Erhärtung des Zementmörtels wurden die Sichtflächen noch steinmetzmäßig bearbeitet, so dass sie eine granitähnliche Optik aufwiesen. Nach Fleck sei hier jedoch aus Kostengründen auf die Verkleidung mit echtem Granit verzichtet worden, nicht aus technischen [Fleck 1904, S. 358].⁴⁰⁴

⁴⁰² Vgl. beispielweise auch die Illerbrücken in Kempten, die Eisenbahnbrücke über die Alz in Garching (Beschreibung im Katalog unter BY4), Chemnitztalviadukt in Chemnitz (Beschreibung im Katalog unter Sa5) u. v. m.

⁴⁰³ Heute Bad Imnau (Stadt Haigerloch, Baden-Württemberg).

⁴⁰⁴ Ebenso bei der Leinebrücke in Grasdorf (Beschreibung im Katalog unter D6): „Zur Vermeidung der den Betonbauten eigenen, unschönen Farbe und um das Ganze mit den Gelenkquadern in Uebereinstimmung zu bringen, sind die Ansichtsflächen der Brücke in Granitnachbildung ausgeführt. Zu diesem Zwecke wurde zugleich mit dem übrigen Beton an den Schalwänden der Sichtflächen ein besonderer Farbmörtel in Stärke

Die Ausbildung von kassettierten Gewölbelaibungen (Abbildung 5.88) ist als Ausnahme zu werten. Im Rahmen des Baus der Augustusbrücke in Dresden wurde die Herstellungsweise beschrieben. So erläuterte der Stadtbaumeister Preßprich, dass zur Auflockerung der eintönigen Betonfläche Holzformen auf die Schalung aufgenagelt worden seien (Abbildung 5.89). Diese habe man unmittelbar vor dem Aufbringen des Gewölbebetons mit einer 5 cm starken Schicht Auflagebeton versehen. Dieser habe durch den Zusatz von Dolomit-Feinschlag und gelbem Kiessand eine gelbliche Sandsteinfärbung aufgewiesen. Nach dem Ausrüsten seien die Flächen noch gestockt worden [Preßprich 1910, S. 363]. Eine ähnliche Ausführung zeigt die Göltzschbrücke in Rodewisch⁴⁰⁵ (Abbildung 5.90): Hier wurden quadratische Kassetten ausgeführt, die ebenso nachträglich steinmetzmäßig bearbeitet wurden.

Bei den württembergischen Brücken war zumeist die Nachbildung rötlichen Sandsteins erwünscht. Der Erbauer der Munderkinger Donaubrücke, Karl von Leibbrand,⁴⁰⁶ beschrieb die dort angewandte Ausführungsweise im Grundsatz sehr ähnlich wie Fleck: Die Stirnen seien mit gehobelten Brettern eingeschalt worden, auf welchen keilförmige Hölzer aufgenagelt wurden, um die Quadereinteilung zu erhalten. Dann wurde ein Zementmörtel im Verhältnis 1 Farbzement: 2 feinem Sand mit einer Dicke von etwa 10 cm auf die Stirnschalung aufgesetzt und festgestampft und der Gewölbebeton aufgebracht, der sich tadellos mit der Vorsatzschale verbunden habe [Leibbrand 1894, S. 553]. Es sei für die Gewölbestirnen rötlich gefärbter Zement im Ton des bunten Sandsteins verwendet und die Oberfläche nachträglich mit Hammer und Schlageisen bearbeitet worden [Leibbrand 1894, S. 555].⁴⁰⁷ Eine dieser Ausbildung sehr ähnliche Optik zeigt bis heute die Schmiechbrücke in Ehingen (Abbildung 5.85).⁴⁰⁸

Diese zeitgleiche Ausführung von Bogenverkleidungen und Gewölbebeton kann als Standard bewertet werden. Die von Liebold gebaute Brücke über die Mulde in Niederschlema weist ebenso diese Ausführungsart auf. In der Baubeschreibung ist zu lesen, dass die Stirnen in Granitoptik entsprechend der bereits wiedergegebenen Beschreibungen ausgeführt wurden.⁴⁰⁹ Um der Verkleidung zusätzlichen Halt zu verleihen, ist hier eine weitere Maßnahme beschrieben: „*Diese Betonquader werden gleichzeitig mit*

von etwa 8 cm eingestampft.“ [Bock, Dolezalek 1901, S. 330]. Die Bossierungen wurden mit dem Spitzisen eingehauen (Abbildung 5.87).

⁴⁰⁵ Beschreibung im Katalog unter Sa23.

⁴⁰⁶ Der ursprüngliche Entwurf mit zwei Bogen stammte von Paul Braun. Da jedoch die Gründung des Pfeilers im Fluss für ungünstig befunden wurde, entwarf Karl von Leibbrand die einbogige Brücke in Beton. Ausgeführt wurde der Bau von Baumeister Max Buck aus Ehingen a. d. Donau [N. N. 1894b, S. 1055].

⁴⁰⁷ Z. B. auch in [Leibbrand 1897a, S. 442–443].

⁴⁰⁸ Vgl. hierzu [Veihelmann 2015a]; Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü6. Auch bei der Ehinger Brücke kann man bestens erkennen, dass die Optik einer Werksteinbrücke gewünscht war. Zum einen weist der Bogen eine aus Beton gefertigte Quaderimitation auf; diese wird sogar noch über die Laibung des Gewölbes fortgeführt. Zum anderen ahmt die Verkleidung der Zwickel unregelmäßiges Zyklopenmauerwerk nach. Die ganze Architektur der Brücke zielt also darauf, dem Betrachter den Eindruck einer Natursteinbrücke zu vermitteln.

⁴⁰⁹ Vgl. hierzu beispielsweise die Beschreibung zur Friedensbrücke in Plauen im selben Kapitel, die ebenso von Liebold erbaut wurde. In den Archivalien der Firma Liebold ist dazu folgende Notiz erhalten: „Es wird Sie vielleicht in diesem Zusammenhang interessieren, dass der Syrtal-Viadukt in Plauen, dessen Hauptöffnung mit 90 m Spannweite lange Jahre die weitest gespannte massive Wölbbrücke der Welt war, von uns in den Jahren 1903/1904 in Bruchstein-Konkretmauerwerk mit furnierten Gewölbestirnen ausgeführt wurde.“ [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13].

dem Mauerwerk ausgeführt, mit demselben durch Flacheisenanker verbunden und in Schablonen, die auf dem Lehrgerüst aufgestellt sind, eingestampft, dass sie eine Masse mit dem Mauerwerk bilden.“ [Mehr 1899, S. 364]. Diese Eisenanker kann man bis heute beispielsweise an der Chemnitzbrücke der ehemaligen Chemnitztalbahn in Stein⁴¹⁰ sehen, bei der Teile der Stirnverkleidung abgefallen sind (Abbildung 5.91). Die Verwendung von Ankern war jedoch nicht obligatorisch, wie die entsprechende Ansicht der Muldebrücke in Göhren zeigt (Abbildung 5.92).⁴¹¹ Beide Brücken wurden nahezu zeitgleich von Liebold in Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise erbaut und befinden sich auch geografisch in unmittelbarer Nähe zueinander. Warum die eine mit, die andere ohne Anker ausgeführt wurde, konnte nicht abschließend geklärt werden.

In die Bogenstirnen eingesetzte Fertigteile, wie sie Holzer und Voigts beim Teufelsgrabenaquädukt in Grub nachweisen [Holzer, Voigts 2011, S. 108–109] und auch im Handbuch der Ingenieurwissenschaften – hier jedoch sehr allgemein und nicht mit speziellem Bezug zu den Bogenstirnen – beschrieben werden [Landsberg 1899, S. 287], können nicht als übliche Bauweise bewertet werden. Lediglich aus der Ebene heraustretende Teile wie Gesimse usw. wurden verbreitet vorgefertigt und nachträglich eingesetzt [Büsing 1905, S. 309]. Die Herstellung solcher Fertigteile zur Ausbildung der Gesimse wurde ausführlich von Bock im Artikel über die Leinebrücke in Grasdorf erläutert. Die Abbildung 5.93 zeigt die verwendete Form. Der Boden bestand aus Gips, die Seiten aus mit Eisenblechen beschlagenen Brettern. Der Gips wurde mit Schellack eingestrichen und gefettet, um das Lösen der Form nach dem Erhärten zu erleichtern. Zur Verminderung des Gewichts wurden Rohre seitlich eingesteckt, die im Fertigteil Hohlräume ausbildeten. Dies sei jedoch unpraktisch gewesen, da das Einstampfen dadurch sehr erschwert worden sei [Bock, Dolezalek 1901, S. 331–332].

Mit der Donaubrücke in Inzigkofen begann das Sichtbarlassen des Gewölbebetons. Dort wurden an der Bogenstirn erhöhte Ringe angebracht, die die Form des Bogens unterstreichen sollten (Abbildung 5.94).⁴¹² Zur Herstellung äußerte sich der verantwortliche Ingenieur Max Leibbrand: „Die hölzernen Fasenleisten und die aus Gips hergestellten Modelle der Ringe wurden auf die Stirnschalungen geschraubt und die ganzen Innenseiten dieser Schalungen mit Schellack verstrichen.“ [Leibbrand 1896, S. 289].⁴¹³ Ein weiteres Beispiel stellen die Moselbrücken von Mehring und Schweich dar, die wiederum von Bernhard Liebold erbaut wurden (Abbildung 5.95). Bei genauer Betrachtung der Abbildung 5.96 kann man erkennen, dass die Bogenverzierung hier durch kreisrunde Löcher in der Stirnschalung mit vorgesetztem Gipsmodell ausgeführt wurde: Die Stirnschalung ist zwar noch vorhanden, die Gipsmodelle wurden jedoch bereits entfernt und die noppenartige Bogenverzierung ist durch die Stirnschalung hindurch zu sehen. Diese Oberflächen wurden dann noch nachbearbeitet. Dazu wurden Gerüste verwendet wie sie die Abbildung 5.97 zeigt.

⁴¹⁰ Beschreibung im Katalog unter Sa4.

⁴¹¹ In den Archivalien der Firma Liebold ist zur Stirnverkleidung folgende Notiz erhalten: „Ansicht des Bogenkranzes ist in Mörtelfournier quaderähnlich hergestellt.“ [StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13; Abbildung 7.48].

⁴¹² Vgl. Kap. 7.3.

⁴¹³ Ein weiterer Hinweis auf die Gipsmodelle findet sich bei [Krüger 1905, S. 179].

Diese Bogenverzierungen in Beton konnten sich in der Folge jedoch nicht durchsetzen. In den meisten Fällen sichtbaren Gewölbebetons ohne Verkleidungen oder Imitationen von Natursteinoberflächen wurde die glatte Oberfläche⁴¹⁴ vorgezogen, wie sie etwa bei den Illerbrücken in Kempten und Lautrach und zahllosen anderen zu sehen ist.

⁴¹⁴ Eventuell steinmetzmäßig bearbeitet.

6 DER INGESPANNTE BOGEN

Steinerne Bogenbrücken gibt es seit der Antike, jedoch änderte sich die Bauweise in signifikanter Weise im Laufe des 19. Jahrhunderts. Wurden die antiken Brücken noch mit begrenzten Spannweiten und je nach Bedarf mehreren Bogen ausgeführt, so ging im 19. Jahrhundert das Bestreben dahin, weitere und kühnere Gewölbe zu bauen. Begünstigt wurde dieses Streben durch das Aufkommen des Portlandzementes mit höherer Druckfestigkeit.

Durch dessen Einsatz traten aber auch neue Schwierigkeiten auf: Der im Vergleich zum Kalk schneller erhärtende Zement konnte nachträgliche Bewegungen im Bogen weniger gut aufnehmen. Wilhelm Housselle beschrieb das Problem in seinem 1878 erschienenen Artikel zur Ausführung von Gewölben: Es sei besonders schwierig, die Konstruktion den Voraussetzungen der theoretischen Berechnung entsprechend auszuführen. Fänden beim Bau einer Bogenbrücke Bewegungen statt, die zur Rissbildung führten, so träten im Gewölbe größere Spannungen auf als bei der Berechnung ermittelt. Um diesem Missstand entgegenzuwirken, verwende man meist einen langsam erhärtenden Mörtel, der nach dem Ausrüsten noch eine gewisse Zeit lang plastisch sei. Auf diese Weise könne sich das Bauwerk noch den Gleichgewichtsbedingungen anpassen und somit den im Voraus kalkulierten Spannungszustand einnehmen [Housselle 1878a, S. 509]. Jedoch zweifelte Housselle den Wahrheitsgehalt dieser Aussage an, hingegen werde ein Teil der im Bogen auftretenden Bewegungen sogar durch den langsam erhärtenden Mörtel verursacht. Durch das Zusammendrücken des Mörtels trete verstärktes Setzen des Bogens auf, was wiederum zu Rissen führe. Dieses starke Setzen sei nur durch die Verwendung eines schnell erhärtenden Mörtels zu vermeiden [Housselle 1878a, S. 510]. Wenn bei dessen Verwendung jedoch während des Wölbens Risse auftreten, so könne man diese lediglich vergießen, *„was bekanntlich eine unsichere Operation von zweifelhaftem Werthe ist.“* [Housselle 1878a, S. 510]. Dementsprechend war die Meinung bezüglich der „richtigen“ Mörtelart gespalten: *„Zunächst ist in betreff der Mörtelart hier ergänzend zu bemerken, dass der Cementmörtel heute für grössere Gewölbeausführungen auch in Deutschland eine ausgedehntere Verwendung findet, obgleich es noch viele Ingenieure giebt, die namentlich für Ziegelgewölbe einem schnell bindenden, langsam erhärtenden Kalkmörtel (...) den Vorzug geben, weil sie der Ansicht sind, dass bei seiner Anwendung die nach dem Ausrüsten des Gewölbes nicht selten auftretenden offenen Fugen oder Risse leichter zu vermeiden seien (...).“* [Schäffer, Sonne 1886, S. 315].

Sowohl die Verwendung des schneller erhärtenden Bindemittels Portland-Zement als auch die stets größer werdenden Anforderungen durch die zunehmenden Spannweiten verschärften das Problem der Rissbildung im Bogen. Wenngleich Risse nicht gleichbedeutend mit einer Einschränkung der Tragfähigkeit sind, so war deren Auftreten dennoch unerwünscht. Im Folgenden soll zum einen ausführlich auf das Thema der Rissbildung eingegangen werden. Zum anderen sollen die ersten bautechnischen Lösungsansätze der Rissproblematik besprochen werden.

6.1 Tragverhalten eines eingespannten Bogens

Vertikale Lasten aus Eigengewicht oder Verkehr, wie sie bei Brücken vorwiegend auftreten, erzeugen eine Normalkraft und ein Biegemoment im Bogen.⁴¹⁵ Die getrennte Darstellung der Berechnungsergebnisse ist jedoch wenig aussagekräftig (Abbildung 6.1). Um die Beanspruchung eines Bogens beurteilen zu können, muss das Zusammenwirken beider betrachtet werden: Die Normalkraft innerhalb einer Fuge und das dort zugleich auftretende Biegemoment können alternativ durch eine exzentrisch angreifende Kraft dargestellt werden. Dabei ergibt sich die Exzentrizität aus $e = M/N$. Trägt man die Exzentrizitäten in jedem Punkt des Bogens in Radialrichtung ab und verbindet die derart erhaltenen Punkte miteinander, so erhält man als Visualisierung der Interaktion von Normalkraft und Biegemoment die Stützlinie (Abbildung 6.2). Die Lage der Stützlinie innerhalb der Bogenkontur gibt Aufschluss über den Beanspruchungszustand im Bogen.

Abbildung 6.3 zeigt einen Bogenquerschnitt (ganz links) sowie drei Fälle der in einer Fuge exzentrisch angreifenden Resultierenden aus Normalkraft und Biegemoment. Im ersten dargestellten Belastungsfall greift diese Resultierende N innerhalb eines Abstandes $e < t/6$ von der Mittellinie an. Der ganze Querschnitt steht in diesem Fall unter Druck. Der Bereich, in dem die Resultierenden lediglich Druckspannungen im Querschnitt auslösen, liegt in einem Abstand von $t/6$ zu beiden Seiten der Mittellinie, also $|e| < t/6$ oder einfacher ausgedrückt das mittlere Drittel des Querschnitts. Dieser Bereich wird auch Kern genannt. Im zweiten Fall greift N in einem Abstand $e = t/6$ an. Dabei stellt sich ein Spannungszustand ein, der am oberen Fugenende Druck aufweist, am unteren Fugenende gerade spannungsfrei wird. Vergrößert sich die Exzentrizität weiter wie im dritten Fall dargestellt, so vergrößert sich der Druck am oberen Ende, am unteren Ende müsste eine Zugspannung entstehen. Da Mauerwerk oder Beton diese Zugkräfte nur mäßig oder gar nicht aufnehmen kann, entsteht an dieser Stelle eine klaffende Fuge.⁴¹⁶ Bei weiterem Herausrücken der Kraft vergrößert sich der Riss bis bei $e = t/2$ das Versagen des Tragwerks eintritt.

Betrachtet man nun die Stützlinie, so ist der Bogen komplett überdrückt und damit rissfrei, wenn sich die Stützlinie im mittleren Drittel der Bogenkontur befindet. Rückt die Stützlinie in den Bereich der beiden äußeren Drittel so entstehen klaffende Fugen. Sobald die Stützlinie über den Rand des Querschnitts hinaustritt, erfolgt der Einsturz des Bogens.

Auch wenn Risse in den meisten Fällen keine Einschränkung der Tragfähigkeit nach sich zogen, wollte man sie dennoch vermeiden. Historisch kann man deshalb wiederholt Äußerungen finden, die darauf abzielten, Brücken derart zu konstruieren, dass in jedem Belastungsfall die Stützlinie im mittleren Drittel bleiben sollte. Beispielhaft sei hier auf ein Zitat aus der Abschrift eines Vortrages vom Berliner ehemaligen königlichen Baurat Krone verwiesen: „Das Gewölbe muß so konstruiert sein, daß das Material desselben selbst für die ungünstigste, einseitige Belastung nur auf Druck beansprucht wird, oder daß die Stützlinie

⁴¹⁵ Historische Entwicklung, ausführliche Analysen sowie heutiger Umgang mit der Bogenberechnung in [Holzer 2013]. Vorliegende allgemeine Betrachtung stützt sich im Wesentlichen auf die angegebene Monographie [Holzer 2013, S. 36–42].

⁴¹⁶ Bei dieser Berechnungsmethode wird die zwar vorhandene, wenn auch geringe Zugfestigkeit gar nicht angesetzt.

für die ungünstigste, einseitige Belastung im mittleren Drittel des Gewölbes bleibt.“ [Krone 1898, o. S.]. Ausführlich beschäftigte sich auch Gustav Tolkmitt mit der Bemessungsthematik von Bogenbrücken.⁴¹⁷ Er bemängelte den fehlenden Praxisbezug vieler Publikationen: Da die seinerzeit verbreiteten Gewölbetheorien einschließlich der Elastizitätstheorie den Entwerfenden im Stich lassen, sei seine Abhandlung *„vorzugsweise für den praktischen Gebrauch des Bauingenieurs zur Erleichterung des Entwerfens gewölbter Brücken bestimmt als ein Hilfsmittel und Leitfaden für die zweckmässige Anordnung der Bogenform und Gewölbestärke.“* [Tolkmitt 1895, S. 1].⁴¹⁸

Auch Tolkmitts Empfehlungen für die Dimensionierung sahen die Stützlinie im mittleren Drittel des Querschnittes: Es gelte für alle Steinkonstruktionen die Regel, dass die Stützlinie *„womöglich innerhalb der sogenannten Kernlinien bleiben soll und unter keinen Umständen in irgend einem Querschnitt ausserhalb desselben liegen darf.“* [Tolkmitt 1895, S. 2]. Wenn eine Stützlinie aus dem Gewölbe heraustrete, führe dies zum Einsturz: *„Denn ein Gewölbe ist nur dann standfest, wenn sich eine Drucklinie⁴¹⁹ finden lässt, die nirgends aus ihm heraustritt.“* [Tolkmitt, Laskus 1902, S. 8]. Sie dürfe nicht einmal den Kanten zu nahe kommen, weil sonst die Beanspruchung des Baustoffes zu stark werde [Tolkmitt, Laskus 1902, S. 6].

Um einen Brückenbogen statisch zu entwerfen, sind zwei Ziele zu verfolgen: die Ermittlung der Bogenform und nachfolgend die Festlegung der Bogenstärke. Zur Suche der Form von eingespannten Bogen mussten Spannweite, Pfeilhöhe, Höhe des Aufbaus über dem Scheitel sowie die Größe der Verkehrsbelastung vorab festgelegt werden. Mit diesen Werten wurde dann ein Rechnungswert für die Scheitelstärke bei Normalbelastung ermittelt [Tolkmitt 1885, S. 265]. Die Normalbelastung beinhaltet das Eigengewicht des Bogens und des Überbaus sowie die Hälfte der Verkehrsbelastung ($z_0 = c+e+p/2$). Das hatte zum Hintergrund, dass die Abweichung von dieser Normalbelastung möglichst klein gehalten werden sollte. Zur Begründung: *„Denn die Mittellinie des Gewölbes kann natürlich nur für einen einzigen Belastungsfall eine Stützlinie sein, die Abweichungen dieser Stützlinie von den Stützlinien für die Grenzfälle der Belastungen fallen aber (nach oben oder unten) am kleinsten aus, wenn die Mittellinie als Stützlinie für die mittlere Belastung auftritt.“* [Tolkmitt, Laskus 1902, S. 22]. Die Gewölbeform wurde nachfolgend entweder graphisch

⁴¹⁷ Insbesondere ist hier auf den „Leitfaden für das Entwerfen und die Berechnung gewölbter Brücken“ [Tolkmitt 1895] zu verweisen. In dieser Monographie leitet Tolkmitt die Formeln für die Bogenbemessung her und erläutert Schritt für Schritt das Vorgehen bei der Dimensionierung eingespannter Brückenbogen.

⁴¹⁸ Auf die ausführliche Darstellung der historischen Entwicklung sowie des Standes der Wissenschaft bezüglich der Gewölbetheorien zum Ende des 19. Jahrhunderts wird an dieser Stelle verzichtet und zum einen auf das schon genannte Werk [Holzer 2013] sowie die umfangreiche diesbezügliche Forschung von Santiago Huerta verwiesen [z. B. Huerta Fernández 2008; Huerta Fernández, Kurrer 2008].

⁴¹⁹ Die Begriffe Drucklinie und Stützlinie meinen eigentlich zwei verschiedene Linien, wurden aber teilweise in der historischen Literatur auch vermischt. Während die Stützlinie, wie ausführlich beschrieben, die Exzentrizität der Resultierenden aus Normalkraft und Biegemoment darstellt und damit ein Mittel zur Bewertung des Kantens der Keilsteine darstellt, ist die Drucklinie (heute ist eher der Begriff Seillinie üblich) ein Mittel, das Versagen aufgrund des Gleitens der Keilsteine darzustellen [Heuser 1872, S. 375]. Bei sehr starken Gewölben gibt es eine deutliche Abweichung der beiden Kurven, bei dünneren Bauteilstärken sind nach Aussage von Holzer die „Unterschiede zwischen Seillinie und Stützlinie freilich gering.“ [Holzer 2013, S. 104]. Die Stützlinie sei die einzige Kurve, die angebe, ob der Bogen unter Berücksichtigung seiner Biegesteifigkeit die angreifenden Lasten aufnehmen könne [Holzer 2013, S. 103]. Ausführliche und mit vergleichender Beispielkonstruktion belegte Untersuchung beider Linien in [Holzer 2013, S. 101–106].

DER EINGESPANNTE BOGEN

konstruiert oder analytisch bestimmt. Es erfolgte die Ermittlung der Form der inneren Gewölbelaibung sowie des Halbmessers im Scheitel.

Zur Ermittlung der Scheitelstärke waren zwei Bedingungen einzuhalten: Zum einen durfte die zulässige Druckspannung im Bogen nicht überschritten werden, zum anderen musste auch bei einseitiger Belastung eine Stützlinie zu konstruieren sein, die ganz innerhalb des mittleren Drittels des Gewölbequerschnitts lag [Tolkmitt 1895, S. 49]. Tolkmitt erläuterte, die Gewölbstärke sei abhängig von der Form und den Abmessungen, dem Belastungszustand sowie der Festigkeit des Baumaterials. Den geringsten Materialaufwand für den Bogen erhalte man, wenn in dem Fall der Normalbelastung die Mittellinie des Gewölbes mit der zugehörigen Stützlinie zusammenfalle [Tolkmitt 1895, S. 39]. Mit den vorab angenommenen Abmessungen und Belastungen des Bogens wurden mit Hilfe zweier Näherungsformeln – jeweils für die beiden zuvor genannten Bedingungen [Tolkmitt 1895, S. 42; S. 47] – Rechenwerte für die Scheitelstärke bestimmt. Der größere der beiden Werte wurde für den weiteren Verlauf der Berechnung hergenommen. Dann ermittelte man den Horizontalschub im Bogen im Normalbelastungsfall. Mit Hilfe zweier Hauptformeln [Tolkmitt 1895, S. 48] wurde die angenommene Scheitelstärke überprüft und nötigenfalls angepasst.

Wenngleich man die Stützlinie in einem Bogen in der Entwurfsphase konstruieren konnte, gab es unvorhersehbare Einflüsse, die dieselbe während des Baus oder auch während der Nutzungsdauer in ihrer Lage ändern und damit die Gefahr der Rissbildung hervorrufen konnten. Beispielsweise merkte Otto Intze in einer Rezension zu Wilhelm Frauenholz' *„Baukonstruktionslehre für Ingenieure“* an, dass in diesem Werk zwar die Lage der Stützlinien innerhalb des inneren Drittels der Gewölbekontur angenommen seien, *„indessen bleibt diese Lage sehr häufig ein unerfüllter Wunsch, wenn nicht besonders günstige Umstände obwalten, oder wenn nicht besondere Hilfsmittel zur Erzielung dieser Lage in Anwendung kommen.“* [Intze 1876, S. 377]. Auch das Handbuch der Baukunde gibt im Zusammenhang mit dem Hinweis, dass die beste Bogenform diejenige sei, deren Stützlinie bei gleichmäßiger Belastung mit der Mittellinie zusammenfalle, folgende Einschränkung an: *„Freilich würde dies genau nur gelten, wenn sich (abgesehen von größeren Störungen) das Gewölbe beim Ausrüsten nicht setzte, was daher bei der Ausführung thunlichst anzustreben ist.“* [Barkhausen 1892, S. 257].

6.2 Das Problem der Rissbildung in Massivbogenbrücken

Die Faktoren, die auf die Stützlinie Einfluss nehmen, sind sehr vielfältig. Die Verschiebung dieser Stützlinie führte zu Rissen im Bauwerk. Diese waren in den meisten Fällen nicht standsicherheitsgefährdend, störend waren sie dennoch. In einem in der Deutschen Bauzeitung veröffentlichten Artikel aus dem Jahr 1908 beschreibt dessen Autor A. Köhler, Technischer Leiter und Oberingenieur bei der Firma Windschild & Langelott, die Problematik wie folgt: Bei fast allen massiven Brücken mit eingespanntem Bogen seien Risse nachzuweisen. Diese treten meist in den Stirnwänden über dem Kämpfer auf, mitunter auch im Scheitel am Intradon. *„Wird nun nicht rechtzeitig für das Dichten dieser Risse gesorgt, so dringt Wasser in sie hinein, und Frost und sonstige Witterungseinflüsse besorgen dann nach und nach ihr Zerstörungswerk. Zum mindesten aber werden sich an den Ansichtsflächen der Bauwerke durch das durchdringende Sickerwasser Schmutzflecke bilden,*

welche jedenfalls nicht zur Verschönerung des Ansehens der Brücke beitragen.“ [Köhler 1908, S. 303]. Während sich diese Risse beim Mauerwerk noch auf mehrere benachbarte Fugen verteilen können, verschlimmerte sich dieses Problem mit dem Aufkommen des Betons: Der monolithische Baukörper bildet einzelne, jedoch größere Risse – eine Verteilung auf mehrere nebeneinander liegende Stellen ist hier nicht möglich.⁴²⁰ Im vorliegenden Kapitel werden diese Einflussfaktoren besprochen, dabei erfolgt die Aufteilung in vier Hauptkategorien: Bewegungen, die während des Wölbens, beim Ausrüsten, direkt nach dem Ausrüsten oder während der Dauer der Nutzung auftreten.

6.2.1 Formänderungen des Lehrgerüsts während des Baus⁴²¹

„Infolge Aufbringen des Wölbmaterials ändert das Lehrgerüst während der Wölbung fortwährend seine Form. So lange nun der zum Bau benutzte Mörtel weich und elastisch bleibt, kann er unter normalen Verhältnissen den Bewegungen des Lehrgerüsts folgen, ohne zu ungünstige Spannungen zu erleiden. Sobald aber die Erhärtung des Mörtels eintritt und dies ist bei Brückenbauten stets vor der Fertigstellung des Gewölbes der Fall, kann der starre Gewölbeteil den Bewegungen des Lehrgerüsts nicht mehr folgen, es entstehen Spannungen in ihm, die zur Rissbildung führen. Das Gewölbe mit nunmehr offenen Fugen erfährt eine andere Beanspruchung, wie bei der ursprünglichen Berechnung vorgesehen war und damit ist die statische Sicherheit desselben verloren.“ [Schönbrunn 1899; 1900, S. 410].

Vorstehendes Zitat von Schönbrunn aus dem Jahre 1899 fasst die Problematik der Bewegungen des Lehrgerüsts bereits im Wesentlichen zusammen. Formänderungen der Lehrgerüste hatten jedoch mehrere Ursachen: An erster Stelle stehen sicherlich die (im schlimmsten Fall ungleichmäßigen) Belastungen durch die Baumaterialien und -abläufe, aber auch Klimaeinflüsse auf Lehrgerüst und Schalung wie Temperatur und Feuchte mussten beachtet werden. Die wesentlichen Faktoren werden nachfolgend besprochen.

Beim Bau einer Gewölbebrücke wurde bis ins 19. Jahrhundert so verfahren, dass der Bogen vom Kämpfer zum Scheitel steigend gemauert wurde.⁴²² Auf diese Weise hob sich jedoch der Scheitel des Lehrgerüsts, die geplante Bogenform wurde verändert. Bereits während des Mauerns, aber auch beim Ausrüsten⁴²³ bewegte sich der Bogen dann mehr oder weniger in die geplante Form zurück. Diese Bewegungen erzeugten Spannungen im

⁴²⁰ Vgl. z. B. Melan: „Diese Risse treten in einem monolithischen Betonkörper noch viel schärfer auf als in gefugtem Mauerwerk, wo sich die Dehnungen meist über eine Anzahl Fugen verteilen und nur schwache Risse bewirken.“ [Melan 1911, S. 200–201].

⁴²¹ In diesem Kapitel werden ausschließlich die Formveränderungen des Lehrgerüsts behandelt, zu den verschiedenen Lehrgerüst-Konstruktionen vgl. Kap. 5.1.

⁴²² Noch 1894 beschreibt Dyckerhoff dies bei Mauerwerksbrücken als Normalfall: „Bekanntlich werden die Lehrbögen zur Herstellung eines Brückenbogens durch die Aufbringung der sehr schweren Lasten von Steinen oder Betonmaterialien ziemlich stark zusammengedrückt. Würde nun, wie es bei gemauerten Gewölben der Fall ist, der Bogen von den Kämpfern an aufwärts hergestellt, so drücken sich die Verschalbögen allmählich immer stärker zusammen und es entstehen Senkungen, welche, je höher das Bogenmauerwerk vorschreitet, um so grösser werden. Dadurch entstehen Risse oder es öffnen sich die Fugen nach den Kämpfern hin.“ [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 112]. Auch Karl von Leibbrand beschreibt bei seinen Brücken das Wölben von den Kämpfern ansteigend: „Das Wölben geschah von den Kämpfern gleichmässig gegen den Scheitel fortschreitend.“ [Leibbrand 1897b, S. 48]. Dass Betonbrücken aufgrund des Bauablaufes anders behandelt werden als Mauerwerksbrücken wird in den Kap. 6.3.1–6.3.4 erläutert.

⁴²³ Vgl. Kap. 6.2.2.

Bogen und erhöhten die Rissgefahr.⁴²⁴ Die Formänderungen resultierten zum einen aus dem Zusammendrücken der Gerüstbauteile sowie deren Verbindungen, aber auch durch Eintreiben der Pfähle in den Untergrund bei großer Belastung. Dieses Phänomen versuchte man zunächst in der konstruktiven Ausbildung des Gerüsts zu minimieren, indem man möglichst steife Gerüste, unnachgiebige Verbindungen sowie eine möglichst hohe Qualität des Holzes verwendete.⁴²⁵ Bei der Ausführung der Verbindungen wurde darauf geachtet, die Hölzer möglichst nicht quer zur Faser zu belasten bzw. falls dies unumgänglich war zusätzliche Maßnahmen zur Druckverteilung zu ergreifen wie etwa Unterlagen aus Hartholz oder Eisen sowie eiserne Schuhe [Gilbrin 1913, S. 28].⁴²⁶ Um die Verformung der Lehrbogen untereinander gleichmäßig zu halten, mussten die äußeren Lehrbogen etwa um ein Viertel des Lehrbogenabstandes von der Gewölbestirn nach innen versetzt werden. Nur so erhielten sie ähnliche Lasten und somit auch vergleichbare Verformungen wie die zentralen Lehrbogen [Schönhöfer 1911, S. 45].⁴²⁷ An den Auflagerpunkten der Gerüststützen wurden ebenso Lastverteilungen angebracht, wenn nötig wurden sogar massive Fundamente erstellt, die nach Fertigstellung der Brücke wieder entfernt wurden. Falls die Gerüststützen eingerammt wurden, musste dies soweit geschehen, dass sie genügende Tragfähigkeit hatten [Gilbrin 1913, S. 28].

Weitere Formänderungen des Lehrgerüsts resultierten aus Temperaturänderungen während der Bauzeit. In den meisten Fällen wurde Holz als Gerüstmaterial verwendet, nur in „*einzelnen Fällen*“ [Gilbrin 1913, S. 30] wurden eiserne Gerüste eingesetzt. Dort waren die Verformungen aus der Temperatur im Vergleich zum Holz noch bedeutend größer: Eisen hat eine weitaus höhere Wärmeausdehnung und auch die Wärmeleitfähigkeit ist um ein Vielfaches höher.⁴²⁸ Berichte zu Verformungen eiserner Lehrgerüste gibt es nur wenige. Gilbrin behauptet zwar, dass beim eisernen Untergerüst der Illerbrücken in Kempten Hebungen und Senkungen bis zu 2,5 cm wahrgenommen wurden, in der Veröffentlichung von Colberg ist darüber jedoch nicht berichtet worden.⁴²⁹ Die Verformungen aus den Temperaturänderungen durch Sonneneinstrahlung waren besonders kritisch, weil diese grundsätzlich nur einseitig auftreten und das Lehrgerüst damit ungleichmäßig verformt wird.⁴³⁰ Um dies zu verhindern, wurden sehr hohe Anstrengungen unternommen: „*Der erheblichen Ausdehnung der eisernen Lehrgerüste bei*

⁴²⁴ Vgl. beispielsweise: „Rückt die Wölbung über einen gewissen Punkt vor, so geht das Gerüst plötzlich wieder herunter, und es entstehen Risse in der Nähe der sogen. Bruchfuge.“ [Barkhausen 1892, S. 326].

⁴²⁵ „Man sucht die Formänderungen des Lehrgerüsts auf ein Kleinstmaß zu beschränken durch Anwendung des sogenannten Ständer- und Strebensystems und Vermeidung von Sprengwerken und Balkenkonstruktionen sowie durch zweckmäßige solide Ausführung, insbesondere durch einwandfreie Ausgestaltung aller Verbindungsstellen, und endlich durch nicht zu hohe Ausnutzung der Festigkeitswerte des Holzes, das von guter Beschaffenheit und völlig gesund sein muß.“ [Gilbrin 1913, S. 27].

⁴²⁶ Vgl. auch [Colberg 1906, S. 236].

⁴²⁷ Vgl. Kap. 5.1.1.

⁴²⁸ Gilbrin gibt im Vergleich Holz – Eisen als Größenordnung für den Ausdehnungskoeffizienten einen Faktor 2, für die Wärmeleitfähigkeit einen Faktor 500 an [Gilbrin 1913, S. 30]. Die Wärmeleitfähigkeit ist insofern relevant als dass davon ausgegangen werden kann, dass die Querschnitte bei hölzernen Gerüsten erst nach und nach auch im Kern eine Temperaturänderung erfuhren. Bei kurzfristiger Erhöhung der Temperatur, also zum Beispiel zeitlich begrenzter Sonneneinstrahlung, bewirkt dies dann eine geringere Ausdehnung.

⁴²⁹ Dagegen spricht er von Verdrückungen im eisernen Lehrgerüst von ca. 25 mm [Colberg 1906, S. 236]. Die Verfasserin geht von einem Fehler in der Arbeit von Gilbrin aus.

⁴³⁰ Vgl. auch [Leibbrand 1906a, S. 611].

steigender Temperatur in den etwa von der Sonne beschienenen Teilen kann durch entsprechendes Verhängen mit Tüchern u. derg. begegnet werden.“ [Leibbrand 1897b, S. 85].⁴³¹

Zusätzliche Verformungen des Lehrgerüsts wurden hervorgerufen von Feuchtigkeitseinflüssen insbesondere aus Regen. Diese bewirkten ein Quellen bzw. beim Austrocknen ein Schwinden der Holzteile des Lehrgerüsts bzw. der Schalung. Um dieses möglichst kontrollieren zu können, wurden die Lehrgerüste feucht gehalten. Hinweise hierzu finden sich beispielsweise bei einem Vortrag von Dr. Leube in der Sitzung des Vereins Deutscher Portlandzementfabrikanten 1894 über die Munderkinger Brücke: *„Damit keine schädlichen Einflüsse durch Aufquellen der Lehrbögen oder der Verschalung auf das Gewölbe oder auf die Kämpfergelenke entstehen konnten, wurde nach Aufstellung der Lehrbögen sämtliches Holzwerk des Lehrgerüsts und die Verschalung, bis zum Gewölbeschluss, möglichst nass gehalten.“ [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 105].⁴³²*

Ganz ausschalten konnte man die Verdrückungen auch abgesehen von den Witterungsproblemen jedoch nie: *„Ein Lehrgerüst, mag es noch so sorgfältig und kräftig ausgeführt sein, wird sich stets beim Aufbringen der Gewölbelast setzen. Die Setzung oder Senkung hat ihre Ursache in der elastischen Formänderung (...).“ [Schönhöfer 1911, S. 45].* Eine möglichst stabile Ausbildung des Gerüsts sowie der sorgfältige Umgang (z. B. Feuchthalten oder Abhängen) senkten die Verformungen jedoch auf ein Minimum.

6.2.2 Risse beim Ausrüsten

Der Zeitpunkt des Ausrüstens ist der sensibelste während des Baus einer Bogenbrücke. Wenn das Lehrgerüst entfernt wird, senkt sich der Bogen, das Material wird unter Spannung gesetzt. Um diese Bewegungen und die damit verbundene Rissgefahr zu minimieren, stellten sich daher zwei Hauptfragen: zum einen nach der angemessenen Frist bis zum Ausrüsten des Bogens und zum anderen nach der sinnvollsten Ausrüstmethode. Dabei galt es in erster Linie, ruckartige Bewegungen des Bogens zu vermeiden, denn diese konnten vom Bogen meist nur unter Auftreten von Rissen aufgenommen werden.⁴³³

Zur Dauer bis zur Ausschalung lassen sich nur allgemeine Angaben machen, ein Regelwerk gab es nicht. Letztlich war die Erfahrung des zuständigen Bauleiters entscheidend.

⁴³¹ Weiteres Beispiel von Gilbrin: Er beschrieb die hohen Anstrengungen beim Bau der Rocky River Bridge, Cleveland, mit einer Spannweite von 85,3 m bei einem Stichmaß von 24,4 m, unter Verwendung eines eisernen Lehrgerüsts: *„Auch hier gelang es nur unter großen Schwierigkeiten, die Bewegungen des Lehrgerüsts auf ein Kleinstmaß zu beschränken. Man schützte es durch vorgehängte Plachen vor Sonnenbestrahlung und hielt die Schalung stets feucht durch Berieselung mit Wasser von gleichmäßiger Temperatur.“ [Gilbrin 1913, S. 30].*

⁴³² Weiteres Beispiel bei Karl von Leibbrand *„Beobachtungen der Lehrbögen hatten gezeigt, dass sich dieselben bei feuchter Witterung in Folge des Aufquellens der Hölzer bis zu 15 mm in der Mitte hoben. Man netzte daher die Lehrbögen in der Nähe des Scheitels tüchtig ein, ehe man die letzten Quaderschichten vergoss, um hiedurch die Gewölbsenkungen möglichst gering zu machen.“ [Leibbrand 1883, S. 354].* Ferner ist zu den Schlitza-Brücken in Tarvis bekannt: *„Während des Betonierens wurde die Schalung durch Besprengen mit Wasser konstant feucht erhalten, um Deformationen derselben durch partielles Austrocknen, wie dies bei der herrschenden Temperatur leicht möglich war, hintanzuhalten.“ [Stanek 1903, S. 349].*

⁴³³ Vgl. beispielsweise: *„Die Operation des Ausrüstens selbst soll mit der grössten Vorsicht geschehen, damit plötzliche Senkungen und der Stabilität nachtheilige Erschütterungen im Gewölbe vermieden werden.“ [Schäffer, Sonne 1880, S. 245].*

Abhängig war die Dauer insbesondere von der Spannweite, der Art der Materialien (Bautechnik und Bindemittel), der Witterungsverhältnisse und auch davon, ob das Lehrgerüst, etwa bei einem mehrbogigen Viadukt, weitere Male verwendet werden sollte [Schäffer, Sonne 1886, S. 323]. Es gab zwei grundsätzlich verschiedene Ansichten zum Ausschalen: Die eine Seite war der Meinung, man solle möglichst früh ausschalen, damit der Mörtel noch weich sei und den Bewegungen des Bogens noch nachgeben könne. Die andere Seite befürwortete ein möglichst spätes Ausschalen, damit der Mörtel schon genügend Steifigkeit erreicht habe, um die Spannungen aufzunehmen.

Verallgemeinert lässt sich sagen, dass bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts – als Kalk noch das allgemein übliche Bindemittel war – eher früh ausgerüstet wurde. Das folgende Zitat stammt von Georg Ludwig August Röder, der im Jahr 1821 seine Monographie zum Brückenbau veröffentlichte: *„Für eine sehr späte Ausrüstung haben wir zwar noch sehr wenige Erfahrungen vor uns, wenn wir sie aber auch hätten, so ist doch das, nur bey früher Ausrüstung mögliche Zusammenpressen der Fugen, sehr wünschenswerth, und kann bey später Ausrüstung nicht erfolgen.“* [Röder 1821, S. 310].⁴³⁴ Er empfahl weiterhin, dass nach all seinen Erfahrungen möglichst schnell, allerdings nicht sofort nach der Fertigstellung des Bogens ausgerüstet werden solle – angemessen seien etwa 14 Tage für Mauerwerksbrücken, Bruchsteinmauerwerk brauche länger.⁴³⁵

Mit dem Aufkommen des Zementes und insbesondere bei Betonbrücken änderte sich die Meinung zum günstigsten Ausrüstungszeitpunkt. Erstmals wurde das Problem des schnellen Erhärtens des Zements beim Probebogen für den Pont-aux-Doubles in Paris im Jahre 1844 erkannt: *„Das sofortige Erhärten des Zementmörtels hatte zur Folge, dass das Gewölbe nach seiner Fertigstellung nur einen einzigen Wölbstein bildete; dadurch wurde es notwendig, die Risse, die normalerweise an den Kämpfern und in den Bogenschenkeln auftauchen, bereits während der Ausführung zu vermeiden.“*⁴³⁶ [Claudel, Laroque 1859, S. 419].

Trotzdem gab es weiterhin beide Meinungen. Der in Württemberg tätige Baurat August Rheinhard schrieb im Rahmen des Baus der Murgbrücke in Heselbach,⁴³⁷ dass lange Wartezeiten bis zum Ausschalen nicht immer vorteilhaft seien. Die Wartezeit sei abhängig von der Erhärtungsdauer des verwendeten Mörtels, bis dieser ausreichend fest sei, um die aufzubringenden Lasten zu tragen. Je kürzer diese Wartezeit sei, also je schneller das Bindemittel erhärte und je früher ausgeschalt werden könne, *„umsoweniger Zufällen ist*

⁴³⁴ Weiteres Beispiel: *„D’abord, il est prouvé maintenant par de nombreux exemples que (...) il n’y a aucun désavantage à décintre les voûtes presque immédiatement après la pose des clefs. Mais (...) il y a, on n’en saurait douter, tout avantage à ce qu’alors le mortier soit encore dans un état qui lui permette de se comprimer, de se mouler suivant de nouvelles figures, sans que sa désorganisation s’en suive (...). Il semble donc qu’il faut maçonner les voûtes et les décintre le plus promptement qu’on pourra, afin d’éviter qu’il n’y ait quelques portions de mortier complètement prises au moment du décintrement.“* [Dejardin 1845, S. 263].

⁴³⁵ *„Für Gewölbe aus Bruchsteinen, auch wenn die Stirnen mit Quadern verkleidet sind, ist es wegen der größern, nicht so schnell austrocknenden Menge des Mörtels, vorthellhaft, sie Anfangs nur ein wenig zu lüften und wenigstens 2 Monate mit der völligen Ausrüstung zu warten, damit der Mörtel sich recht innig mit den Steinen verbinden könne.“* [Röder 1821, S. 310–311].

⁴³⁶ Original: *„La prise du mortier de ciment étant presque instantanée, la voûte ne devait former qu’un seul voussoir après son achèvement; il fallait alors éviter les ruptures qui ont ordinairement lieu aux naissances et aux reins des voûtes pendant leur exécution.“*

⁴³⁷ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü9.

dann auch ein solches Bauwesen, z. B. durch Hochwasser ausgesetzt.“ [Rheinhard 1887, S. 340–341].

Auch im Handbuch der Ingenieurwissenschaften wurden noch 1880 beide Standpunkte vertreten, allerdings bereits mit der Empfehlung der längeren Wartezeit: *„Die Meinungen über die Zweckmässigkeit einer längeren oder kürzeren Wartezeit vom Gewölbeschlusse bis zur Ausrüstung sind sehr getheilt. Während verschiedene Constructeure die Vornahme der Ausrüstung bald nach Schluss des Gewölbes empfehlen – weil sie glauben, dass dann der noch für äussere Einwirkungen empfängliche Mörtel sich ohne schädliche Spannungen im Gewölbe und ungleichmässige Uebertragung des Druckes auf die Lagerflächen zu erzeugen, der neuen Gleichgewichtslage des Gewölbes besser anzupassen vermöge, als ein durch längere Wartezeit vollkommen erhärteter Mörtel – huldigen andere der entgegengesetzten Ansicht, indem sie behaupten, dass es in erster Linie darauf ankomme, die Senkung des Gewölbes nach dem Ausrüsten, welche eben die der Stabilität nachtheiligen Verschiebungen in den Constructionstheilen herbeiführt, auf ein Minimum zu reduciren und dass man dies durch die Vornahme der Ausrüstung bei vollständig erhärtetem Mörtel, also nach langer Wartezeit erreichen könne.“* [Schäffer, Sonne 1880, S. 244–245]. Die Praxis habe gezeigt, dass die längere Wartezeit für kein Gewölbe, unabhängig von den verwendeten Materialien, schädlich sei. Dagegen habe eine zu kurze Wartezeit schon häufig das Versagen eines Gewölbes verursacht: Durch den herausquellenden Mörtel sei die innere Laibung dermaßen verkürzt worden, dass die Gefahr des Einsturzes gegeben sei [Schäffer, Sonne 1880, S. 245].

Interessant in diesem Zusammenhang ist die Entwicklung des ersten Satzes dieser zitierten Passage in der zweiten und dritten Auflage des Handbuchs: In der zweiten Auflage von 1886 steht hier statt *„Die Meinungen (...) sind sehr getheilt“* nur noch *„sind geteilt“* [Schäffer, Sonne 1886, S. 323]. In der dritten Auflage 1899 heißt es explizit: *„Die Meinungen (...) sind heute kaum noch geteilt.“* [Landsberg 1899, S. 292]. Spätestens zu diesem Zeitpunkt muss man von einem späten Ausrüsten als Standard ausgehen. Für Spannweiten über 20 m seien deshalb mindestens vier Wochen anzusetzen.⁴³⁸

Zum kontrollierten, stoßfreien Absenken des Lehrgerüsts wurden die bereits in Kapitel 5.1.2 besprochenen Ausrüstvorrichtungen eingesetzt. Diese ersparten dennoch nicht die genaue Planung und sorgfältige Ausführung jedes Ausrüstvorganges. Zur Ausrüststrichtung gab es mehrere, von Grund auf verschiedene Ansichten: vom Kämpfer in Richtung Scheitel – oder genau umgekehrt; überall gleichmäßig usw. Hierbei ist selbstverständlich die Konstruktion des Bogens mit entscheidend: Ein Dreigelenkbogen wird immer anders behandelt werden als ein eingespannter Bogen. Eine „Standardregel“ konnte bei der Auswertung der Beschreibungen der Ausrüstungsvorgänge zahlreicher Brücken nicht gefunden werden, letztlich kam es neben der Konstruktion insbesondere auf die Ansichten des verantwortlichen Ingenieurs an. Im Folgenden werden verschiedene Aussagen zusammengetragen, wovon einige in völligem Widerspruch zueinander stehen.

⁴³⁸ Vgl. auch: *„Demnach erscheint es allgemein zweckmässig, mit dem Ausrüsten von Betonbögen, je nach Mörtelbeschaffenheit, Jahreszeit, Temperatur, 4–6 Wochen lang, und unter Umständen noch länger zu warten; die Frist von 4 Wochen aber nur bei zwingendsten Verhältnissen noch einzuschränken.“* [Büsing 1892, S. 257–258].

DER EINGESPANNTE BOGEN

Eine frühe Beschreibung eines eingespannten Bogens, wonach mit dem Ausrüsten in den Kämpfern begonnen und Richtung Scheitel fortgefahren wurde, liefert Röder im Jahr 1821: „Man rüstet aber am besten folgendermaßen aus: die Lagerkeile und Balken an den Anfängen der Bögen, werden alle zugleich und an allen Bögen, wenn deren mehrere sind, ausgeschlagen und weggenommen, und damit fährt man gegen den Scheitel fort; bey gleichförmigem Ausschlagen wird auch die Senkung der Bögen gleichförmig erfolgen.“ [Röder 1821, S. 311]. Diese Ausrüstungsrichtung ist eher außergewöhnlich, denn erwartungsgemäß tritt die größte Senkung des Bogens im Scheitel ein.

Max Leibbrand schlug hingegen ein gleichzeitiges Ausrüsten am ganzen Bogen vor: „Die Ausschaltung soll weder vom Scheitel nach dem Kämpfer noch umgekehrt, sondern möglichst gleichmäßig und in einer Reihenfolge von einzelnen Senkungen vorgenommen werden.“ [Leibbrand 1906c, S. 465]. Auch diese Form des Ausrüstens ist eher als Ausnahme bei eingespannten Bogen zu werten. Bereits einige Jahre früher wurden die Nachteile dieses Ausrüstvorganges im Handbuch der Ingenieurwissenschaften erläutert: „Wenn bei dem Ausrüsten alle beweglichen Teile des Lehrgerüsts mit gemeinschaftlicher Geschwindigkeit gesenkt werden, so ist dies im allgemeinen unzweckmäßig, weil jedes Gewölbe sich im Scheitel mehr senken wird, als am Kämpfer. Bei gleichmässiger gleichzeitiger Senkung wird sich daher der Kämpfer bereits vom Gerüste gelöst haben, während der Scheitel noch fest aufliegt. Dies kann bei flachen Gewölben ein Rutschen in der Nähe der Kämpferfugen zur Folge haben; jedenfalls aber wird dadurch eine Neigung zum Öffnen der oberen Lagerfugen in der Nähe des Scheitels hervorgerufen. Deshalb ist es besser, dort, wo im Gewölbe ein grösseres Setzen zu erwarten steht, auch vorerst eine teilweise, gleichmässig zu regelnde Senkung eintreten zu lassen.“ [Landsberg 1899, S. 293].

Das Ausrüsten im Scheitel beginnend zu den Kämpfern hin war zumindest bei den eingespannten Bogen das häufigste Mittel, Gilbrin bezeichnet es als „bekannte Weise“ [Gilbrin 1913, S. 36–37]⁴³⁹ und auch Emperger vertrat diese Ansicht: „Das Ablassen des Lehrgerüsts erfolgt in der Regel vom Scheitel nach den beiden Kämpfern hin.“ [Emperger 1911, S. 421].

Ganz anders verhielt es sich bei Dreigelenkbogen.⁴⁴⁰ Colberg schrieb im Rahmen seines Artikels zu den Illerbrücken in Kempten zum Ausrüsten bei Dreigelenkbogen, dass er auf dem Standpunkte stehe, dass ein Dreigelenkbogen anders behandelt werden müsse als ein eingespannter. Beim letzten sei es in den meisten Fällen richtig, das Lehrgerüst zuerst im Scheitel etwas abzulassen und dann allmählich die benachbarten Punkte mitzunehmen, „um so vom Scheitel nach den Kämpfern zu in stetig zunehmenden Spannungen den Bogen unter Druck zu setzen“ [Colberg 1906, S. 264]. Beim Dreigelenkbogen sei dieses Verfahren verwerflich, „da der Scheitel vermöge seiner Drehfähigkeit die Abwärtsbewegung sofort mitzumachen bestrebt sein wird und hierbei die benachbarten Bogenteile im Obergurt in stärkste Zugspannungen setzt. Fassen wir demgegenüber den Dreigelenkbogen als das, was er eigentlich ist, als ein System zweier Gewölbe, auf, so ergibt sich das hier einzuschlagende Verfahren nach dem Vorhergesagten von selbst, nämlich, daß der Dreigelenkbogen in den

⁴³⁹ „Das Ausrüsten selbst erfolgt in der bekannten Weise. Man beginnt mit dem Senken des Lehrgerüsts im Scheitel und schreitet damit allmählich gegen die Kämpfer zu fort.“ [Gilbrin 1913, S. 36–37].

⁴⁴⁰ Vgl. Kap. 7.

Mitten seiner beiden Schenkel beginnend abgelassen werden muß, und daß hierauf allmählich die benachbarten Punkte beider Schenkelmitten nach dem Scheitel und nach den Kämpfern zu mitgenommen werden müssen.“ [Colberg 1906, S. 264]. Diese Methode setzte sich bei den Dreigelenkbogen durch. Im Jahr 1913 schrieb Gilbrin, dass sich dieses von Colberg empfohlene Verfahren bei Dreigelenkbogen sehr gut bewährt habe [Gilbrin 1913, S. 36–37].⁴⁴¹

Der Ausrüstvorgang wurde bei allen größeren Brücken genauestens kontrolliert, lediglich wenige Dokumentationen sind überliefert: Abbildung 6.4 zeigt den Ausrüstungsplan der Rosensteinbrücke in Bad Cannstatt [Siegrist 1914, S. 209].⁴⁴² Hierbei sind unter der Schemazeichnung eines der großen Bogen die während des Betonierens, während des Gewölbeschlusses bis zum Ausrüsten und beim Ausrüsten ermittelten Senkungen vermerkt. Darunter, in der Tabelle, ist das Ausrüstschema beschrieben: Jeweils auf ein Signal hin wurden alle im jeweiligen Schritt mit Zahlen versehenen Spindeln um die jeweilige Anzahl an Achtel-Umdrehungen gesenkt. In diesem Beispiel wurde das Lehrgerüst also vom Scheitel aus beginnend in Richtung der Kämpfer entlastet.

Zusammenfassend beschreibt Büsing die Probleme während des Bauablaufs bis zum Ausrüsten: Man benötige *„in der Konstruktion des Lehrgerüstes und beim Ausrüsten grosse Vorsicht. Das Lehrgerüst muss möglichst unwandelbar, und die Ausrüstung erst ausgeführt werden, wenn der Mörtel gut erhärtet ist, also nur noch geringe Pressbarkeit besitzt. Daneben gebe man eine so grosse Ueberhöhung,⁴⁴³ dass selbst ein unerwartetes Senken des Scheitels beim Ausrüsten die Stützlinie noch nicht aus dem Kern des Querschnitts heraus drängt und verfare beim Belasten des Lehrgerüstes, beim Einbringen und Stampfen des Betons, ausreichend sorgsam, damit nicht Verschiebungen des Lehrgerüstes entstehen, welche die rechnungsmässige Lage der Stützlinie im Gewölbe wesentlich ändern.*“ [Büsing 1892, S. 255]. Weitere Rissgefahren ergaben sich unmittelbar nach dem Ausrüsten, diese werden im folgenden Kapitel dargestellt.

6.2.3 Risse nach dem Ausrüsten

Die Rissgefahren in der ersten Zeit nach dem Ausrüsten setzen sich hauptsächlich aus drei Einzel-Phänomenen zusammen: die Erhöhung der Lasten durch die Aufbauten, dem Schwinden und Kriechen des Baumaterials sowie den Bewegungen in den Widerlagern.

Die Erhöhung der Lasten durch die Aufbauten ist in den meisten Fällen als unproblematisch zu werten, da meist so spät ausgeschalt wurde, dass der Bogen bis zur

⁴⁴¹ Z. B. auch bei der Leinebrücke Grasdorf [Bock, Dolezalek 1901, S. 335] und der Illerbrücke Lautrach (vgl. Kap. 8.4) verwendet.

⁴⁴² Ein weiteres Beispiel sind die Illerbrücken in Kempten (Abbildung 6.24). Der Ausrüstvorgang begann demnach, wie von Colberg beschrieben, in den Bogenschenkeln und setzte sich dann gleichmäßig in Richtung der Kämpfer und des Scheitels fort. Hierbei geben die Punkte unterhalb der Zeichnung den Ablauf des Ausrüstens an: Die Reihen sind von oben nach unten zu lesen, die oberste Reihe markiert den ersten Absenkschritt usw. Auf gleicher Höhe liegende Punkte wurden gleichzeitig in gleichem Maße abgesenkt [Colberg 1906, S. 264].

⁴⁴³ Vgl. Kap. 6.2.3.

nahenden Vollendung der Überbauten durch das Lehrgerüst gestützt wurde.⁴⁴⁴ Wo dies nicht der Fall war, musste darauf geachtet werden, dass die fehlenden Aufbauten sich nicht derartig nachteilig auf die vorübergehende Stützlinie auswirkten, dass diese sich aus dem Querschnitt bewegte. Im Zweifelsfall sollte das Lehrgerüst länger vorgehalten oder eine künstliche Belastung aufgebracht werden [Leibbrand 1906c, S. 465]. Allgemein galt, dass mindestens die Hintermauerung bis zu den Bruchfugen vor dem Ausrüsten erstellt werden sollte, *„damit das Gewicht dieser Mauermassen den Gleichgewichtszustand des Gewölbes nach dem Ausrüsten nicht verändert.“* [Schäffer, Sonne 1880, S. 245].

Weit schwieriger in der Bewertung erwiesen sich die Formänderungen aus Schwinden und Kriechen. Das Phänomen war zwar erkannt worden – insbesondere bei der Verwendung von Beton, wo die Formänderungen größer waren als bei Werksteinbrücken. Kontrollieren bzw. vorherbestimmen konnte man sie in den Anfangszeiten des Stampfbetonbrückenbaus jedoch nicht. Zur Inzigkofener Donaubrücke gibt es folgende ausführliche Beschreibung der Beobachtungen zu Schwinden und Kriechen von Max Leibbrand: *„Die Beobachtung, daß der Scheitel auch bei der nachgewiesenermaßen völligen Unnachgiebigkeit des Untergrundes noch geraume Zeit nach dem Ablassen des Lehrgerüstes sich weiter gesenkt hat, weist darauf hin, daß bei der Berechnung der Scheitelsenkung nicht bloß die Temperatur und die Elastizität des Betons (...) in Rechnung genommen werden muß, sondern eine weitere Volumenverminderung. Diese Volumenverminderung rührt zweifellos teilweise davon her, daß der Beton bei dauernder Belastung eine weitere Zusammendrückung erfährt, als bei gleicher vorübergehender Belastung, sowie davon, daß der Beton in den ersten Monaten der Erhärtung infolge der chemischen Vorgänge und durch mechanische Verdunstung der Feuchtigkeit sich zusammenzieht. In welchem Umfange dies geschieht, sollte durch weitere Versuche im Laboratorium, vor allem aber durch exakte Beobachtung der auszuführenden und ausgeführten Beton- und Steingewölbe geschehen.“* [Leibbrand 1895/96, S. 77]. Bei der Inzigkofener Brücke misst Leibbrand während des Ausrüstens eine Scheitelsenkung von 7,5 mm, die Senkung aus Kriechen und Schwinden beträgt jedoch 17 mm, ist also sogar noch größer als diejenige während des Ausrüstens. Hieraus folgert Leibbrand die Wichtigkeit dieses Phänomens sowie die Notwendigkeit der gründlichen Erforschung [Leibbrand 1895/96, S. 77].

Im Rahmen des Baus der Eyachbrücke in Imnau findet Max Leibbrand seine Beobachtungen bestätigt, auch hier hat er nachträgliche Senkungen aus Kriechen und Schwinden festgestellt. Er schreibt zu deren Untersuchung: *„Diese Beobachtung ist unerlässlich, wenn man zu sicheren Ergebnissen über die zu erwartende Senkung gelangen will, da die Senkung nach dem Ablassen grösser ist als während des Ablassens.“* [Leibbrand 1898, S. 191].

Zum Schwindmaß fanden einige Laborversuche statt, die Gilbrin jeweils kurz beschreibt [Gilbrin 1913, S. 18–21]. Allen gemein sei jedoch, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Gründen nur mäßig belastbar waren. Die Versuche zum Schwinden seien *„weder zahlreich, noch in jeder Beziehung vollkommen“* und zwar weil die Temperaturveränderungen beim Abbinden nicht berücksichtigt sowie die Messergebnisse nicht auf das bei der Herstellung

⁴⁴⁴ Durch die Erhöhung der Lasten durch die Aufbauten konnte es aber natürlich zu weiteren Verformungen im Lehrgerüst kommen.

vorhandene, sondern auf das ein bis zwei Tage später ermittelte Maß bezogen wurden. Des Weiteren seien auch andere Umstände wie die Feuchtigkeitsgehalte der Zuschläge sowie der umgebenden Luft nicht beachtet worden [Gilbrin 1913, S. 18]. Die Höhe des Schwindmaßes sei abhängig vom Zementgehalt, vom Wasserzusatz bei der Bereitung des Mörtels bzw. Betons, von der Lufttemperatur sowie der Luftfeuchtigkeit, des Weiteren von den Eigenschaften von Zement und Zuschlägen sowie der Art der Herstellung. All diese Faktoren wurden bei den Laborversuchen nicht ausreichend beachtet, worauf die großen Unterschiede in den beschriebenen Ergebnissen zurückzuführen seien [Gilbrin 1913, S. 18].

Letztlich wurde das Schwinden über einen Ersatzfaktor entsprechend einer zusätzlichen Wärmeänderung berücksichtigt. In den „*Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton*“ des Deutschen Ausschusses für Eisenbeton (1916–01) ist in § 15, Abs. 2 zu lesen: „*Der außerdem zu ermittelnde Einfluß des Schwindens des Betons an der Luft ist dem eines Wärmeabfalls von 15° C gleich zu achten.*“ [Fingerloos 2009, S. 75].⁴⁴⁵ In einem sehr ausführlichen Artikel von Karl Schaechterle beschreibt dieser die Phänomene des Schwindens nochmals detailliert [Schaechterle 1928]. Dabei liegt sein Hauptaugenmerk darin, welche Möglichkeiten zur Verringerung der Volumenänderung des Betons anzuwenden seien.⁴⁴⁶ Man könne dies beispielweise durch bereits vorbetonierte Quadersteine erreichen, was jedoch in wirtschaftlicher Hinsicht nachteilig sei. Dagegen kommen Mischkonstruktionen aus Natur- oder Betonstein und vor Ort eingebrachtem Stampfbeton häufig vor. Ein Beispiel dafür sei der Pont de la Caille⁴⁴⁷ nahe Cruseilles [Schaechterle 1928, S. 602].

Diese Brücke mit der gewaltigen Lichtweite von rund 140 m bei einer Pfeilhöhe von 27 m wurde mit unbewehrtem Gewölbe ausgeführt. Die Bogenabwicklung von etwa 150 m ließ große Längenänderungen aufgrund Schwindens erwarten und so wurden bereits vier bis fünf Monate zuvor erstellte Betonplatten aufgestellt, deren Zwischenräume dann mit Stampfbeton ausgefüllt wurden (Abbildung 6.5). Deren Volumen betrage etwa ein Drittel des gesamten Gewölbematerials: „*Die Verwendung dieser Konstruktionselemente hat den Zweck, die durch Schwinden und Ausrüsten hervorgerufenen Deformationen auszugleichen.*“ [Paris 1928, S. 831]. Die Nachteile solcher Konstruktionen beschrieb Schaechterle mit hohen Kosten und verlängerten Bauzeiten [Schaechterle 1928, S. 603].

Eine Senkung des Scheitels komplett verhindern konnte man nicht. Die Gesamtsenkung setzte sich aus den beschriebenen Phänomenen zusammen: Verdrückungen des Lehrgerüsts,⁴⁴⁸ das Nachgeben des Scheitels beim Ausrüsten sowie nachträgliche

⁴⁴⁵ Deutscher Ausschuss für Eisenbeton, Bestimmungen für Ausführung von Eisenbeton- und Betonbauwerken, 1925–09, § 16, Abs. 2: „Bei statisch unbestimmten Tragwerken ist dem Einfluss des Schwindens auf die statisch unbestimmten Größen durch die Annahme eines Temperaturabfalls von 15° Rechnung zu tragen.“ [2009, S. 105].

⁴⁴⁶ Ähnliche Aussage im „Handbuch für Eisenbetonbau“: „In neuerer Zeit wird Wert darauf gelegt, schon bei der Ausführung des Bogens die Schwinderscheinungen möglichst auszuschalten, da sie oft beträchtliche Zusatzspannungen ergeben, die zu unwirtschaftlichen Konstruktionen führen und die Rißbildung begünstigen.“ [Emperger 1932, S. 241].

⁴⁴⁷ Auch Pont Caquot genannt (nach dem zuständigen Konstrukteur Caquot). Beschreibung im Katalog unter I6.

⁴⁴⁸ Vgl. Kap. 6.2.1.

Senkungen durch Kriechen⁴⁴⁹ sowie durch die Auflast⁴⁵⁰ der Aufbauten.⁴⁵¹ Diese Scheitelsenkungen wurden genau gemessen, dokumentiert und die Erfahrungen für weitere Brückenbauten verwendet. Abbildung 6.6 zeigt ein solches Messprotokoll der Donaubrücke in Munderkingen. Bewegungen wurden sowohl im Scheitel als auch in den Widerlagern gemessen. Weitere Beispiele von überlieferten Messprotokollen, die diese Senkungen genau dokumentieren finden sich z. B. für die Donaubrücke Inzigkofen [Leibbrand 1896, S. 291], die Eyachbrücke Imnau [Leibbrand 1898, S. 191] oder den Pont de la Coulouvrenière⁴⁵² in Genf [Séjourné 1913d, S. 84].

Um diese Senkungen letztlich auszuschließen bzw. zu beherrschen, wurde das Lehrgerüst um die erwartete Gesamtsenkung überhöht gebaut. Überhöhungen wurden bereits seit langem praktiziert, Hinweise finden sich z. B. bei [Claudel, Laroque 1860, S. 165]. Diese jedoch vorherzubestimmen, stellte die Ingenieure vor große Herausforderungen. Schönhöfer schrieb noch 1911, dass eine genaue Berechnung dieser Überhöhung auf unüberwindliche Schwierigkeiten stoße. Es erscheine auch praktisch zwecklos, wenn man all die unvorhersehbaren Umstände bedenke, welche auf die Setzung einen Einfluß ausüben können [Schönhöfer 1911, S. 46]. Überlegungen zu den Überhöhungen der Lehrgerüste stellten also ausnahmslos Näherungslösungen dar.

Letztlich war das Ziel, die einzelnen Senkungen möglichst realitätsnah abzuschätzen und dann aufzusummieren. Zur Verdrückung des Gerüsts gibt Schönhöfer folgendes Vorgehen an: *„Man verfolge, vom Scheitel ausgehend, alle jenen Hölzer, welche den Scheiteldruck auf dem nächsten Wege in den Boden leiten, rechne sich deren elastische Verkürzungen, wobei bei schrägen Hölzern die Projektion auf die Lotrechte zu nehmen ist, und gebe zu dieser erhaltenen Summe die Verpressungen sämtlicher auf dem vorgenannten Wege liegenden Stoßstellen.“* [Schönhöfer 1911, S. 46].⁴⁵³ Diese Vorgehensweise ist recht aufwändig, weswegen in der Praxis auch Abschätzungsformeln verwendet wurden. Beispielfhaft sei hier auf Melan und auf Bauernfeind verwiesen: Die Berechnung nach Bauernfeind erfolgte in Abhängigkeit von Spannweite (s) und Pfeilhöhe (p) des geplanten Bogens. Für gestützte Lehrgerüste war demnach die erwartete Einsenkung $t = \frac{1}{200}(s - p)$ ⁴⁵⁴ [Barkhausen 1892, S. 303]. Was recht einfach aussieht erweist sich allerdings bei näherer Betrachtung als durchaus kompliziert, denn der Faktor $\frac{1}{200}$ war mehr oder weniger frei anpassbar. Bei Überprüfung mittels mehrerer ausgeführter Brücken schwankte dieser Wert beachtlich⁴⁵⁵

⁴⁴⁹ Vgl. Kap. 6.2.3.

⁴⁵⁰ Vgl. Kap. 6.2.3.

⁴⁵¹ Vgl. hierzu z. B.: „Die Einsenkung setzt sich zusammen aus der Einsenkung während des Betonierens und aus der Einsenkung während des Ausschalens. Hierzu treten unter Umständen, wenn man von den Wärmeänderungen absieht, noch die Einsenkungen infolge Zusammenpressung des Betons und infolge Widerlagerbewegungen. Die Größe der Einsenkungen gibt natürlich einen Maßstab für die zweckmäßige Ausführung des Lehrgerüsts.“ [Emperger 1911, S. 422].

⁴⁵² Beschreibung im Katalog unter I19.

⁴⁵³ Eine ausführliche Beschreibung der Berechnung liefert auch Leibbrand zur Donaubrücke Munderkingen. Hier schildert er die Berechnung und Aufsummierung der einzelnen Zusammendrückungen (Widerlager, Bogen, Lehrgerüst) [Leibbrand 1894, S. 555].

⁴⁵⁴ Bei der Verwendung von gesprengten Lehrgerüsten mit $\frac{1}{100}(s - p)$.

⁴⁵⁵ Zwischen 0 und 0,0164 bei 26 Brücken [Barkhausen 1892, S. 313].

und selbst die Mittelwerte dieser Messergebnisse wichen von dem empfohlenen Wert nochmals deutlich ab.⁴⁵⁶ Auch Büsing bezieht sich auf die Bauernfeindschen Formeln und merkt dazu an, dass diese auch für Betonbrücken anzuwenden seien, da Fugenzahl und -weiten nicht in der Formel vorkommen. Da jedoch mehrere Einflussfaktoren vorhanden seien, *„wird die obige Formel (...) meist nur ungefähr zutreffende Zahlen liefern und muss man in Einzelfällen auf mehr oder weniger grosse Abweichungen der wirklichen Senkung von der berechneten sich gefasst machen.“* [Büsing 1892, S. 257].

Melan beschrieb im zweiten Band des Brückenbaus seine Abschätzung: Bei ausgeführten Brücken seien für die Scheitelsenkung des Lehrgerüsts 0,002 bis 0,004 l ermittelt worden, mit l ist die Lichtweite des Bogens bezeichnet. Dazu komme noch die Senkung beim Ausrüsten, die im Durchschnitt mit etwa 0,0005 r angenommen werden könne.⁴⁵⁷ Somit sei ein Mittelwert für die Überhöhung des Lehrgerüsts $u = 0,003 l + 0,0005 r$ [Melan 1911, S. 344].

In der Praxis wurde sogar häufig komplett auf eine Vorberechnung der Gesamtsenkung verzichtet und die Überhöhung lediglich nach Erfahrungswerten bemessen.⁴⁵⁸ Im Zweifelsfall galt, die Überhöhung grundsätzlich eher zu groß als zu klein zu wählen. Eine ausführliche Begründung dafür liefert Schönhöfer: *„Bei einer zu gering bemessenen Überhöhung wird die dadurch hervorgerufene Durchhängung des Wölb Bogens nicht nur in statischer Hinsicht viel nachteiliger sein als eine Überhöhung desselben, sondern es wird auch eine Durchhängung dem Auge viel eher bemerkbar werden, indem namentlich die Bekrönung der Wölbbrücke, wenn dieselbe nach unten ausgebogen ist, auf den Beschauer höchst unangenehm wirkt, während ein Ansteigen derselben gegen die Mitte gut aussieht und sehr oft absichtlich ausgeführt wird.“* [Schönhöfer 1911, S. 45]. Die Überhöhung des Lehrgerüsts ist als Stand der Technik zu bezeichnen. Es ist zwar nicht von allen Brücken eine Angabe hierzu überliefert, allerdings gibt es einige verallgemeinerte Aussagen dazu in den einschlägigen Brückenbaubüchern.⁴⁵⁹ Des Weiteren ist bei einigen Brücken eine Überhöhung des Lehrgerüsts explizit beschrieben worden.⁴⁶⁰

⁴⁵⁶ Mittelwert: 0,0035 zu empfohlenem Wert: 0,005 [Barkhausen 1892, S. 313], wobei die Überhöhung damit auf der sicheren Seite liegt.

⁴⁵⁷ r ... Scheitelhalbmesser.

⁴⁵⁸ Vgl. z. B. Schönhöfer: *„In der Praxis pflegt man auch vielfach von einer Berechnung der Überhöhung abzusehen, indem man dieselbe auf Grund ausgeführter ähnlicher Fälle annimmt.“* [Schönhöfer 1911, S. 45].

⁴⁵⁹ Z. B. im Handbuch der Baukunde: *„Damit das Gewölbe schliesslich die Form erhalte, welche es nach dem Entwurf haben soll, muss man das Lehrgerüst um das ganze Maass der zu erwartenden Senkung (Summe der Senkung vor dem Gewölbeschluss und derjenigen beim Ausrüsten) überhöhen.“* [Barkhausen 1892, S. 313], sowie in Melans Brückenbuch: *„Wegen der Senkungen, die das Lehrgerüst während der Ausführung des Gewölbes erfährt, und weiters wegen jener Senkungen des Gewölbes, die nach dem Ausrüsten zu erwarten sind, muß dem Lehrgerüst eine Scheitelüberhöhung gegeben werden.“* [Melan 1911, S. 344], sowie im Handbuch der Ingenieurwissenschaften: *„Das Gerüst soll ausserdem von vornherein eine Ueberhöhung erhalten, deren Grösse von der Construction desselben, dem Gewichte des Gewölbes und der Art und Weise der Ausrüstung des letzteren abhängt.“* [Schäffer, Sonne 1880, S. 237].

⁴⁶⁰ Z. B. Leinebrücke Grasdorf um 9 cm [Bock, Dolezalek 1901, S. 330], Illerbrücke Lautrach um 6 cm [L. (Liebold) 1904, S. 454], Illerbrücken Kempten um 7,34 cm [Colberg 1906, S. 236], Prinzregentenbrücke München 20 cm [N. N. 1901b, S. 8]; nach einer anderen Aussage 25 cm [Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. (1925), S. 19] usw.

DER EINGESPANNTE BOGEN

Eine weitere, ganz beträchtliche Gefahr für Brückenbogen stellten Bewegungen in den Widerlagern dar. Dabei gab es grundsätzlich zwei verschiedene Arten: horizontale und vertikale Bewegungen; bei ungleichmäßigen Bewegungen konnten auch Drehungen entstehen. Vertikale Bewegungen, also Setzungen, resultierten aus der Auflast durch die Brücke auf die Widerlager und dem dadurch hervorgerufenen Zusammenpressen des Untergrundes. Horizontale Verschiebungen waren vornehmlich eine Folge des Horizontalschubes aus dem Bogentragwerk.⁴⁶¹ Dabei erfolgte ein gewisses Zusammendrücken des Untergrundes zwangsläufig bereits während des Baus. Schwierigkeiten traten aber dann auf, wenn nach erfolgtem Ausrüsten der anstehende Baugrund keine ausreichende Festigkeit aufwies.

Eine ausführliche Abhandlung dazu lieferte Friedrich Engesser im Centralblatt der Bauverwaltung im Jahr 1900 [Engesser 1900]. Ein Gleichgewicht im Widerlager sei dann vorhanden, wenn der Erddruck ausreichend sei, um der Horizontalkraft entgegenzuwirken. Sei dies nicht der Fall, weiche das Widerlager aus bis der größer werdende Erddruck wiederum die Kraft aufnehmen könne. Wie weit sich allerdings die Widerlager verschieben müssen, um das Gleichgewicht zu erreichen, sei weder durch Rechnung noch durch Erfahrungswerte bestimmbar. Dies sei abhängig von Bodenbeschaffenheit, Gründungstiefe und Bogengeometrie. Bei eingespanntem Bogen nehme der Horizontalschub bei Ausweichen der Widerlager bedeutend ab. Hingegen seien diese Bogen stark schadensanfällig, da sich die Spannungen innerhalb des Materials hierbei wesentlich erhöhen. Ein lokales Überschreiten der Festigkeitswerte führe dann zu Rissen an den Kämpfern [Engesser 1900, S. 308].

Ein Beispiel dafür ist vom Bau des Chemnitztalviaduktes, 1898–1899, überliefert: So schreibt Schönbrunn, dass nach dem Ausrüsten des ersten Bogens ein Widerlagerpfeiler um 10 mm nachgegeben habe. Die Neigung konnte durch Anschüttungen rückgängig gemacht werden. Jedoch merkte er an, dass bei einem eingespannten Gewölbe diese Bewegung sicher zu Schäden geführt hätte [Schönbrunn 1900, S. 18].

Im Normalfall führen bereits geringe Verschiebungen in den Kämpfern zu Klaffungen. Zumeist bleibt es bei der Bildung von Rissen, nur im Extremfall kommt es zum Einsturz. Ein besonders eindrückliches Beispiel dafür ist die bereits in Kap. 4.4 beschriebene Brücke der Firma Feege & Gotthard, die für die Düsseldorfer Kunst- und Gewerbeausstellung im Jahr 1880 gebaut wurde (Lichtweite 22 m, Pfeilhöhe 1,75 m). Die Brücke wurde nach Fertigstellung einer Probelastung ausgesetzt. Dabei wurden auf einer Bogenhälfte 400 kg pro m² Last aufgebracht, ohne dass dabei Schäden am Bogen aufgetreten seien. Während der kompletten Ausstellung war die Brücke in Betrieb und war dabei auch großem Menschengedränge ausgesetzt. Bis zum Ende der Ausstellung zeigten sich an der Brücke keinerlei auffällige Veränderungen – weder eine Scheitelsenkung noch eine Bewegung in den Widerlagern [K. 1881, S. 120]. Am Ende des Jahres stürzte die Brücke jedoch im unbelasteten Zustand ein [Schwering, Schlierholz 1881, S. 538]. Der Grund dafür war, dass nach starken Regenfällen der Untergrund aufgeweicht war. Dabei wichen die Widerlager um 37 cm in horizontaler sowie 24,5 cm in vertikaler Richtung aus [K. 1881, S.

⁴⁶¹ Möglich aber eher selten ist im Brückenbau das Zusammenrücken der Widerlager durch den Erddruck; vgl. das Beispiel Altenburg–Langenleuba im Kap. 7.3. (Beschreibung dieser Brücken im Katalog unter D8).

120]. Das Versagen des Bogens erfolgte aufgrund eines Bruches am Kämpfer infolge der immensen Verschiebungen. Dennoch sah Regierungsbaumeister Ludwig Schwering den Einsturz nicht als Mangel der Betonbauweise an. Das Versagen sei begründet durch mangelhafte Fundierung, was durch den provisorischen Charakter des Bauwerks veranlasst sei [Schwering 1881, S. 346].

Beispiel zu den Bewegungen während und unmittelbar nach dem Ausrüsten:

Ein Beispiel, bei dem die sorgfältige Dokumentation der Bewegungen vom Zeitpunkt des Ausrüstens an überliefert ist, ist die Betonbrücke über die Westernach⁴⁶² bei Erbach an der Donau. Genaue Kontrollen der während und unmittelbar nach dem Ausrüsten auftretenden Bewegungen in den Fugen⁴⁶³ wurden sowohl schriftlich als auch in Plänen festgehalten [StALB, Sign. E 166 Bü 4313]. Diese Dokumentation beinhaltet mehrere Aspekte der Rissbildung und ist deshalb besonders aussagekräftig. Die Brücke (Abbildung 6.7) verfügte über eine lichte Weite von 32 m bei einem Stichmaß von 4 m, stellte also eine durchaus flach gespannte Brücke dar.

Die Arbeiten an dem Bauwerk erfolgten im Sommer/Herbst 1887, die Ausschalung des Hauptgewölbes am 7. und 8. November 1887. Mit diesem Datum beginnen auch die Messungen sowohl der Senkungen als auch der Drehungen an Scheitel- und Kämpfergelenken. Die Abbildung 6.8 zeigt das Protokoll der Senkungen. Hierbei stellen die oberen Linien die Bewegungen in den Widerlagern⁴⁶⁴ sowie in den Nebengewölben dar. Die untere, wesentlich steilere Linie zeigt die Senkung des Gewölbescheitels in Abhängigkeit von den weiteren Aufbauten („*Betonieren der Stirnmauern*“, „*Hinterfüllung der Gewölbe*“, „*Versetzen der Gurtquader und Aufbringen der Chaussierung*“). Die Abbildung 6.9 zeigt die infolge der Senkungen aufgetretenen Verdrehungen der Scheitel- und Kämpfergelenke vom Zeitpunkt der Ausschalung bis zum 10. Januar 1888.

In der Abbildung 6.10 ist die Brücke mit den Messpunkten sowie dem Aufbau der Gelenkeinlagen zu erkennen. Des Weiteren findet sich hier auch das Protokoll zum Lösen der Gerüstkeile während des Ausrüstens. Zu den Messungen ist eine ausführliche Beschreibung im Staatsarchiv Ludwigsburg erhalten, die im Nachfolgenden ungekürzt wiedergegeben wird:⁴⁶⁵

⁴⁶² In der Literatur mit Westrach oder Westerach bezeichnet, gelegentlich wird diese Brücke auch irrtümlich als Donaubrücke bezeichnet (z. B. in [Büsing 1899]). Eigene Recherchen im Archiv sowie vor Ort ergaben, dass diese Brücke nicht mehr vorhanden ist.

⁴⁶³ Diese Brücke war mit Gelenkeinlagen versehen, deshalb sind hier Gelenkfugen beschrieben. Zur Ausbildung und Wirkungsweise dieser Einlagen vgl. Kap. 7.5.2.

⁴⁶⁴ Dokumentiert sind bei den Widerlagern Vertikal- und Horizontalverschiebungen, bei den Nebengewölben Vertikalverschiebungen.

⁴⁶⁵ In diesem Zitat erfolgt auch schon eine Vorausschau auf eine weitere Rissgefahr: durch Änderungen der Temperatur (vgl. Kap. 6.2.4). Um hier aber die umfassende Dokumentation komplett wiedergeben zu können, wird dieser Teil des Zitates trotz des thematischen Vorgriffs mit abgedruckt.

„2. Westrachbrücke

Die Ausschalung des Hauptgewölbes erfolgte am 8. November, nachdem die beiden Ankengewölbe⁴⁶⁶ schon einige Tage zuvor ausgeschalt worden waren. Nach viermaligem Senken der Unterlagskeile, je nach Lage derselben von den Kämpfern gegen die Mitte zunehmend, jedesmal um 5–20 m/m (...) trug sich das Gewölbe frei und betrug die Senkung des Scheitels zu dieser Zeit –: 48 m/m dieselbe hat sich nachher, insbesondere unter Einwirkung der aufgebrachten Belastungen (Hinterfüllung, Stirnmauern, Chaussierung, Brüstungen) auf –: 120 m/m erhöht, wie aus der angeschlossenen graphischen Darstellung (Beil. 1) näher zu ersehen ist. Da gleichzeitig das linke Widerlager sich um 26 m/m, das rechte um 6 m/m senkte, so beträgt die relative Scheitelsenkung bloß $120 - 26 + 6 / 2 = 104$ m/m. Die Lehrbögen waren mit Rücksicht auf die zu erwartende Scheitelsenkung unter Zugrundelegung einer Ueberhöhung der Bogenlinie um 100 m/m im Scheitel konstruiert worden, hatten sich jedoch vor Beginn des Betonirens in Folge der voll aufgebrachten Kiesbelastung um 10 m/m zusammengedrückt, so daß beim Schließen des Gewölbes nur noch 90 m/m Ueberhöhung im Scheitel vorhanden waren. Die jetzige Gewölbförmigkeit weicht danach im Scheitel um $104 - 90 = 14$ m/m, also ganz unerheblich, von der berechneten Linie ab.

Für die Beobachtung der bei und nach dem Ausschalen stattfindenden Bewegungen waren an verschiedenen Stellen des Gewölbes und der Widerlager Marken angebracht, welche in der angeschlossenen Planpause (Beil. 2) eingezeichnet sind, die Vorrichtungen zum Messen der Verschiebungen bestanden theils aus Zeigerapparaten mit zehnfacher Übersetzung, welche die Verschiebungen an einer Skala direkt abzulesen gestatteten, theils aus gegenüberstehenden Eisenplättchen mit scharfen Kanten, deren Abstand durch Meßkeile bis auf $1/10$ m/m gemessen werden konnten. In der Beil. 2 ist ein Theil der Beobachtungsergebnisse, insbesondere auch die Bewegung in den Drehfugen, graphisch dargestellt.

Die große Kälte des Jahresanfangs gab Gelegenheit zur Beobachtung der Temperatureinwirkung auf die Bewegungen des Gewölbes. Es zeigte sich, daß der Gewölbscheitel, welcher am 2. Januar bei -21° R [sic] seinen tiefsten Stand hatte, sich mit Eintritt des Thauwetters wieder um 9 m/m hob; auch ließ sich ein Wiederöffnen der Scheitelfuge oben, wenn auch in kaum meßbarem Maße, nicht verkennen.

Nach vollzogener Ausschalung des Gewölbes wurden die Akkordanten sofort veranlaßt, die Einschaltungen für die Stirnmauern herzustellen und erfolgte die Betonirung der letzteren am 19. bis 21. November; nach 8-tägiger Erhärtung wurden dieselben ausgeschalt und nun ohne Verzug mit dem Aufbringen der Hinterfüllungen begonnen. Dank der anhaltenden gelinden Witterung war es möglich noch Mitte Dezember die Gurtquader ohne jedem Nachtheil für deren Haltbarkeit zu versetzen und das Gelände anzubringen, so daß die Brücke am 20. Dezember zugleich mit der eisernen Donaubrücke vollständig fertig, dem Verkehr übergeben werden konnte.“ [StALB, Sign. E 166 Bü 4313].

⁴⁶⁶ Das Wort „Anken“ bezeichnet die Bogenzwickel. Dieser Begriff war in den heute üblichen Sprachlexika (z. B. Duden) nicht ermittelbar. Da es ebenso im Zusammenhang mit den Brückenbauten in Munderkingen, Esslingen und Ehingen verwendet wird, geht Verfasserin davon aus, dass es sich um einen mundartlichen Ausdruck aus dem Schwäbischen handelt.

Die Westernach-Brücke in Erbach stellt ein außergewöhnliches Beispiel der Dokumentation dar. Sie ist allerdings keinesfalls als Ausnahme zu werten, sondern als Standardfall: Lediglich die Überlieferung solcher Messprotokolle ist lückenhaft, erstellt wurden sie mit Sicherheit bei jedem größeren Brückenbau. Beispielfhaft sei hier auf Karl von Leibbrands Buch „*Gewölbte Brücken*“ verwiesen, wo auf den Seiten 50 bis 53 Tabellen zu seinen Steinbrücken in Höfen, Wildbad, Neuneck, Marbach sowie den beiden in Baiersbronn befindlichen Bauwerken zeigen, welche aufwendigen Messungen an den Brückenbauten angestellt wurden [Leibbrand 1897b, S. 50–53].⁴⁶⁷

Die bisher beschriebenen Phänomene der Rissbildung traten während des Baus oder hauptsächlich in der ersten Zeit nach dem Ausrüsten auf. Aber auch während der Lebensdauer einer Brücke gibt es weitere Schadensrisiken, hervorgerufen durch verschiedene Einflüsse. Diese werden im Folgenden näher beleuchtet.

6.2.4 Risse während der Nutzungsdauer

Hauptinflussfaktoren sind hierbei die Temperaturveränderung sowie Bewegungen aus den dynamischen Belastungen. Die Wirkung von Feuchtigkeit und dadurch bedingtes Quellen und Schwinden waren gering, werden aber der Vollständigkeit halber in diesem Kapitel auch behandelt.

Bei Betrachtung des Einflussfaktors Temperatur sind nochmals zwei grundsätzlich verschiedene Phänomene zu unterscheiden: die Längenänderungen aufgrund großer Temperaturunterschiede zwischen Sommer und Winter und damit verbundene Scheitelhebungen und -senkungen sowie die auftretenden Nebenspannungen durch Verwindungen innerhalb eines Gewölbes aufgrund einseitiger Erwärmung durch Besonnung.

Durch Sonneneinstrahlung wird lediglich eine Gewölbeseite erwärmt und es folgt hier eine Ausdehnung des Materials. Die gegenüberliegende Seite erhält diese Erwärmung nicht und bleibt im ursprünglichen Zustand. Die Folge ist eine Verdrehung des Bogens im Grundriss. Die einseitige Besonnung wurde in der Stampfbeton-Literatur weitgehend vernachlässigt. E. H. Hoffmann schrieb dazu im Jahr 1880, dass diese Bewegungen durch die Elastizität des Materials aufgenommen werden [Hoffmann 1880, S. 310]. Emil Mörsch lieferte hingegen im Jahr 1900 eine theoretische Betrachtung im Hinblick auf Dreigelenkbogen. Darin erläuterte er, dass die ungleichmäßige Temperaturerhöhung auf den Gewölbequerschnitt bezogen wie ein in den Kämpfergelenken aufgebrachtes Moment wirke. Die Berechnung erfolgte vereinfacht mit den Formeln für den geraden Stab [Mörsch 1900, S. 194–195]. Eine Aufnahme in die Brückenbemessung fand das Phänomen jedoch nicht, die Beurteilung der Randbedingungen und deren Auswirkungen auf das Gewölbe

⁴⁶⁷ Weiteres Beispiel zur Inzignkofener Donaubrücke von Max Leibbrand: „Um dabei die Bewegungen des Scheitels und der Widerlager genau beobachten zu können, waren die Zeigerwerke mit den Kämpfer- und Scheitelgelenken an beiden Schauseiten verbunden. (...). Die Zeigeranordnungen, mit zehnfacher Uebersetzung arbeitend, ermöglichten die senkrechte und wagrechte Bewegung der Widerlager und die Senkung des Scheitels auf 1/10 mm genau zu beobachten.“ [Leibbrand 1895/96, S. 75] sowie weitere Beschreibung und Tabelle der Messergebnisse auf S. 76. Weiteres Beispiel Donaubrücke Munderkingen, vgl. Abbildung 6.6.

DER EINGESPANNTE BOGEN

blieben schwierig.⁴⁶⁸ Gilbrin beschreibt die Problematik wie folgt: „*Noch unübersichtlicher werden die Temperaturverhältnisse im Inneren der Gewölbe, wenn Teile desselben für längere Zeit, wenn auch mit zeitweiligen Unterbrechungen, der Sonnenbestrahlung ausgesetzt sind (...)*.“ [Gilbrin 1913, S. 10]. Eine Diskussion bezüglich dieses Phänomens fehlt im ansonsten auf Vollständigkeit angelegten Werk von Gilbrin völlig. Er nimmt den Umstand lediglich als Begründung dafür, dass bei der Bemessung Vereinfachungen hinsichtlich der Temperatureinflüsse nötig seien [Gilbrin 1913, S. 10].

Wesentlich umfangreicher sind hingegen die Aussagen zu den Auswirkungen der Lufttemperatur und den daraus folgenden Längenänderungen im Gewölbe. Durch Abkühlen der Lufttemperatur im Winter sowie Erwärmung derselben im Sommer gibt es über die Jahreszeiten hinweg betrachtet Schwankungen auch in der Gewölbetemperatur. Diese Temperaturänderungen führen zu Verkürzungen bzw. Verlängerungen der Bogenlinie. Der Bogen nimmt diese Längenänderungen durch Senken bzw. Heben des Scheitels auf. Beim eingespannten Bogen kann es hierbei zur Bildung von Rissen kommen.

Beispielsweise wurden bei der Dracbrücke in Claix solche Bewegungen im Bauwerk aufgrund Temperaturveränderungen dokumentiert. Hierbei wurde festgestellt, dass bei einer Lufttemperaturveränderung von 52° zwischen kalter und warmer Jahreszeit die Vertikalbewegung des Scheitels 7 mm betrug. An der Stirnseite traten dabei während jedes Winters neun Risse auf, die sich im Laufe des Sommers jeweils wieder schlossen [Cendre 1879, S. 23].⁴⁶⁹ Ein weiteres Beispiel solcher Beobachtungen findet sich etwa bei Karl von Leibbrands Brückenbau in Teinach, wo er eine Hebung des Scheitels abhängig von der Lufttemperatur von rund 1 mm je 2½° C Erwärmung feststellte [Leibbrand 1883, S. 355]. Während man anfangs noch davon ausging, dass das Material diese Bewegungen rissfrei aufnehmen könne,⁴⁷⁰ gab es diesbezüglich auch Gegenstimmen. So bemerkte Emil Winkler in seinem Aufsatz zur Lage der Stützlinie, dass der Einfluss der Temperaturänderungen gar nicht so gering sei, „*als man gewöhnlich anzunehmen pflegt.*“ [Winkler 1879; 1880, S. 59]. Er stellte fest, dass es bei flachen Gewölben möglich sei, dass die Stützlinie allein infolge der Temperatureinflüsse aus dem mittleren Drittel heraustreten könne, selbst wenn diese ansonsten richtig bemessen sei. Er empfahl deshalb, Gewölbe bei geringer Temperatur auszuführen, um die schädlichen Auswirkungen möglichst gering zu halten [Winkler 1879; 1880, S. 59].⁴⁷¹

⁴⁶⁸ „Eine ziffermäßige Berechnung hierüber aufzustellen, ist bei dem vollständigen Mangel diesbezüglicher Beobachtungen unmöglich.“ [Hermanek 1897, S. 420].

⁴⁶⁹ Original: „Les fissures se rouvrent chaque hiver et se referment chaque été“. Es sind auch wesentlich frühere Beobachtungen zu Temperaturveränderungen bekannt, wie beispielsweise Vicats Untersuchungen der Brücke von Souillac [vgl. Vicat 1831].

⁴⁷⁰ Vgl. etwa die aus dem Protokoll der Versammlung des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten des Jahres 1894 stammende Aussage: „Jeder Bogen, aus welchem Material er auch hergestellt sein mag, hebt und senkt sich je nach dem Wärme- und Kältegrad der Luft durch das Dehnen und Zusammenziehen der Baukörper, doch üben diese minimalen Bewegungen keinen nachtheiligen Einfluss auf den Bau aus, da alle Baumaterialien viel höhere Elastizität besitzen, welche diese Bewegungen aufnehmen, als diese Veränderungen des Bogens ausmachen.“ [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 113]. Oder noch 1899 im Handbuch der Ingenieurwissenschaften: „unschädlich sind die Formänderungen, die infolge der Änderungen der Luftwärme entstehen, falls nicht etwa Konstruktionsfehler begangen worden sind.“ [Landsberg 1899, S. 302].

⁴⁷¹ Ebenso das Handbuch der Ingenieurwissenschaften [Schäffer, Sonne 1886, S. 331].

Wenngleich das Phänomen bekannt war, intensivierte sich die Auseinandersetzung mit den Längenänderungen im eingespannten Bogen erst um die Jahrhundertwende.⁴⁷² Insbesondere die zunehmenden Spannweiten und die kühner werdenden Pfeilverhältnisse führten zu einer Verschärfung des Problems.⁴⁷³ So setzte sich beispielsweise der Wiener Ingenieur Johann Hermanek in seinem 1897 publizierten Artikel mit dem „*Einfluss von Temperaturschwankungen auf Gewölbe*“ auseinander. Einleitend beanstandete er, dass diese Auswirkungen, welche sehr beträchtlich seien und sogar jene der üblichen Verkehrslasten überschreiten, im Allgemeinen nicht beachtet werden [Hermanek 1897, S. 419]. Eine genaue Berechnung sei aber wohl nicht erreichbar, da die Art der Ausbreitung der Temperatur in den Gewölben in Abhängigkeit von der Lufttemperatur nicht bekannt sei. Und auch der Einfluss von Überschüttungen, die zwar die Gesamttemperaturänderung im Gewölbe positiv beeinflussen, dagegen aber in Bezug auf die gleichmäßige Temperaturverteilung in einem Gewölbequerschnitt nachteilig wirken, mache die ziffermäßige Berechnung bei dem „*vollständigen Mangel diesbezüglicher Beobachtungen*“ unmöglich [Hermanek 1897, S. 419–420]. In der Folge leitete er Formeln zur Berechnung von auftretenden Spannungen infolge Temperatureinfluss sowie den daraus folgenden Formänderungen her. So berechnete er in einem Zahlenbeispiel diesbezüglich bei einem Bogen von 40 m Lichtweite und einem Pfeilverhältnis von 1/10 (also 4 m Pfeilhöhe) bei einer Temperaturänderung von 50° eine Scheitelbewegung von 67 mm [Hermanek 1897, S. 426–427]. Zusammenfassend bezeichnete er die Einflüsse aus der Temperatur als sehr bedeutend. Übermäßig große Gewölbestärken seien zu vermeiden. Im Interesse der Dauerhaftigkeit eines Bogens seien vielmehr geringere Stärken, dagegen möglichst gutes und zugfestes Material zu verwenden [Hermanek 1897, S. 426].

Noch 1902 bemängelte Fritz von Emperger, der Ausdehnungskoeffizient von Beton sei „*für das Bauwesen von der größten Wichtigkeit, und seine Berücksichtigung bei Projectierung aller Art von Betonbauten höchst wünschenswert, umsomehr, als die Erkenntnis der Bedeutung dieser Frage sich nur langsam Bahn bricht.*“ [Emperger 1902, S. 300]. Im Bruchsteinmauerwerk verteilen sich die Längenänderung bzw. die daraus eventuell entstehenden Risse auf mehrere Fugen. Mauerwerk mit Portlandzement, also Beton, verhalte sich dagegen monolithisch und bilde deshalb einen einzigen Riss. Insbesondere bei schwächeren Abmessungen seien Betonbauwerke empfindlich gegenüber Temperaturveränderungen. Er stellte dabei auch die Frage, inwieweit sich die Schwankung der Außentemperatur im Objekt verbreite, da nur lange anhaltende Temperaturen ihren Weg abhängig von Material und Bauteildicke ins Innere finden. Bei

⁴⁷² In der Wissenschaft sowie im Zusammenhang mit Konstruktionen aus Eisen wurden Temperatureinflüsse bereits seit Jahrzehnten untersucht, so sei beispielsweise auf [Winkler 1868, S. 358–369] verwiesen. Dort wird zwar auch die Anwendbarkeit der Betrachtungen auf den Werkstoff Stein genannt, dennoch fanden die theoretischen Betrachtungen noch keinen Eingang in die Bemessungs- und Baupraxis des Massivbrückenbaus. Eine weitere kurze Betrachtung erfolgte im Rahmen der Messungen am Probobogen der Zementfabrik Blaubeuren in Ehingen in den Jahren 1896–1899 [vgl. Hoch 1904 sowie Kap. 4.4].

⁴⁷³ Vgl. beispielweise Beutels Artikel zu den Illerbrücken in Kempten und Lautrach: „Bei der Konstruktion solcher grösserer Betongewölbebögen ist eine Eigenschaft des Betons von besonderer Wichtigkeit und muss genügend berücksichtigt werden; es ist dies seine gegenüber den natürlichen Steinen sehr hohe Temperatureausdehnung, der zufolge grössere Betonkörper bei eintretenden Temperaturschwankungen erheblichen Längenveränderungen ausgesetzt sind. (...) Diese Eigenschaft spielt bei weitgespannten freiliegenden Betonbögen, die den Temperatureinflüssen in erheblichem Grade ausgesetzt sind, eine grosse Rolle.“ [Beutel 1903; 1904, S. 411].

DER EINGESPANNTE BOGEN

Beton könne deshalb die Schwankung wesentlich kleiner als 60°C angenommen werden [Emperger 1902, S. 300].

Zur Ausbreitung der Temperatur abhängig von der Umgebungstemperatur wurde der Versuch eines dänischen Ingenieurs Grut aus dem Jahre 1903 beschrieben: „Bei Betonhohlzylindern von 14 cm innerem und 34 cm äußerem Durchmesser, wurde der innere Hohlraum auf 1000° erhitzt und auf dieser Temperatur längere Zeit erhalten, während die Temperaturerhöhung an verschiedenen und vom inneren Rande des Hohlzylinders verschieden weit abstehenden Punkten des Betonkörpers gemessen wurde. Nach 7–8 Stunden trat der Gleichgewichtszustand ein, und dabei betrug beispielsweise in 9 cm Abstand von der Innenseite die Temperatur im Betonkörper nur 264° .“ [Schürch 1910, S. 9].⁴⁷⁴

In den Folgejahren erwies sich wiederum Fritz von Emperger als einer der Hauptbefürworter der Reduzierung des vorgeschriebenen Maßes der Temperaturschwankungen. 1909 veröffentlichte er einen ausführlichen Artikel zum Thema [Emperger 1909b]. Er bezog sich darin auf einen Erlass des österreichischen Ministeriums des Innern, wonach die „Wärmeschwankungen (...) für Temperaturschwankungen von -20 bis $+30^{\circ}\text{C}$ “⁴⁷⁵ zu berücksichtigen seien [Emperger 1909b, S. 349]. Dies werde in der Praxis aber meist so ausgelegt, dass diese Schwankung von 50° in der Lufttemperatur ebenso für den ganzen Baukörper angesetzt werde. Zur Klarstellung untersuchte er, ob diese Differenz von 50°C überhaupt ein angemessener Wert sei und betrachtete mittlere sowie die Maxima der Tages- und Monatstemperaturen. Insbesondere bei Betrachtung der Monatsmittel der Stadt Wien errechnete er einen wesentlich geringeren Wert von $22,1^{\circ}\text{C}$ und auch bei den Maximalwerten blieb sein Wert unter den angenommenen 50° . Weiterhin untersuchte er die Frage, wie sich die Lufttemperaturen auf den Baukörper übertragen und fand heraus, dass die Tagesmaxima diesbezüglich nicht relevant waren, weil sie sich auf das Innere des Baukörpers, insbesondere bei Bauteilstärken über 90 cm, kaum auswirkten. Die gesamte Schwankung im Mauerwerk betrage im Ganzen etwa 30° . In einer Ergänzung zu diesem Artikel beschrieb er in der Zeitschrift „Beton und Eisen“ die bei der Walnut Lane Bridge in Philadelphia gemachten Beobachtungen [Emperger 1909a]. Die dort ausgeführten Messungen bezüglich Bogen- und Lufttemperaturen sowie Scheitelbewegungen erfolgten von März 1908 bis in den Mai 1909. Dabei fand er seine Aussagen aus dem ersten Artikel voll bestätigt: Die Bogentemperatur stimme relativ gut mit den Wochenmittelwerten der Außenwerte zusammen, jedoch trete die Anpassung etwas zeitversetzt auf. Zusammenfassend stellte er fest, dass bei der Walnut Lane Bridge Differenzen in der Außentemperatur von 52°C im Inneren der Bogen lediglich einen Unterschied von etwa 23°C hervorgerufen haben (Abbildung 6.11).⁴⁷⁶ Die gemessenen Scheitelbewegungen

⁴⁷⁴ Die Originalquelle ist in dänischer Sprache verfasst und wurde im Rahmen vorliegender Arbeit nicht überprüft.

⁴⁷⁵ Vorschrift über die Herstellung von Tragwerken aus Stampfbeton oder Beton-Eisen bei Hochbauten, vom 15.11.1907. § 3. Berechnungsgrundlagen. Abs. 14: „Die Wärmeschwankungen sind (...) für Temperaturgrenzen von -20 bis $+30$ Grad Celsius unter Annahme eines linearen Ausdehnungskoeffizienten für Beton gleich $0,0000135$ für einen Grad Celsius zu berücksichtigen.“ abgedruckt in [Haberalt 1908, S. 265].

⁴⁷⁶ Ein weiteres Beispiel ist die Isonzobrücke bei Salcano: Örley beschreibt dort die Messungen von Temperatur und Scheitelbewegungen. Trotz erheblicher Schwankungen der Lufttemperatur habe der Scheitel jedoch seine Höhenlage unverändert beibehalten. Sein Fazit: „Will man hieraus einen Schluß auf die Eigenart

stimmten ebenfalls mit der reduzierten Temperaturdifferenz gut überein, was Emperger als Beweis für die Richtigkeit seiner Annahme sah. Die diesbezügliche Anpassung der Vorschriften sei in der Schweiz bereits vorgenommen (Reduzierung auf 30° C) und in Österreich beantragt (Reduzierung auf 40° C). Emperger hingegen schlug vor, die Regelung bauteilstärkenabhängig anzuwenden, d. h. bei einer Bauteilstärke von 20 cm seien 40° C anzusetzen, bei 50 cm hingegen 34° C und bei 1 m 24° C [Emperger 1909a, S. 381].⁴⁷⁷

Um die gemachten Beobachtungen weiter zu festigen, wurden verschiedentliche Messungen unternommen.⁴⁷⁸ 1914 wird im Zentralblatt der Bauverwaltung von Messungen an der Brooklyn Avenue Bridge in Los Angeles berichtet. Diese wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren ausgeführt. Wiederum zeigte sich, dass bei Schwankungen in der Außenluft von ca. 40° C die Unterschiede im Inneren des Gewölbes lediglich 20° betragen. Dieses Ergebnis bestätige die Annahme, dass die Schwankung im Inneren etwa die Hälfte der Schwankung der Außentemperatur betrage [Ks. 1914, S. 336]. Weitere, sehr umfassende Messreihen zu den Temperaturzuständen in Gewölben wurden am Langwieser Viadukt (1912–1914 erbaut) der Chur–Arosa-Bahn unternommen. Der zuständige Ingenieur Hermann Schürch veranlasste diese Messungen, weil er sich aufgrund der speziellen Randbedingungen besondere Aufschlüsse erwartete. Diese bestehen zum einen im Gebirgsklima mit dementsprechenden Temperaturen, zum anderen aus der Konstruktion mit aufgelöstem Bogen und einer Lichtweite von 98 m [Schürch 1916, S. 240–241]. Schürch ließ im Bogen an 30 Stellen Thermometer einsetzen, die über einen Zeitraum von über einem Jahr dreimal täglich abgelesen wurden. Auf diese Weise erhielt er rund 36.000 Messwerte, die er in Diagramme eintragen ließ. Die äußerst ausführlichen Diskussionen und Bewertungen sollen hier nicht im Detail wiedergegeben werden. Sein Fazit war, dass bei großen Betonbrücken ein Spielraum von 18–30° C herrsche, der je nach Abmessungen bzw. Exposition der Bauteile aber bis auf 40° C steigen könne [Schürch 1916, S. 300].

Nachdem die Schweiz⁴⁷⁹ und Österreich⁴⁸⁰ hier bereits Anpassungen vorgenommen hatten, fand in Deutschland erst mit den Bestimmungen von 1916 die reduzierte

eines derart massiven Gewölbes ziehen, so kann es nur der sein, daß die periodischen Schwankungen der Lufttemperatur nur auf eine verhältnismäßig dünne Schale des Gewölbes von Einfluß sind, daß aber dessen Kern von dieser Einwirkung nahezu unberührt bleibt!“ [Örley 1910, S. 543].

⁴⁷⁷ Weitere Beobachtungen werden in [Gilbrin 1913, S. 11] beschrieben: Eine 1909/10 gebaute Eisenbetonbrücke mit 43 m Spannweite und einer Pfeilhöhe von 5 m zeigte bei einem Anstieg der Außentemperatur von 30° C eine Temperaturerhöhung im Material von 10,8° C.

⁴⁷⁸ Schürch fasst diese Versuche 1916 zusammen: Diese wurden an einer Balkenträgerbrücke in Augst, Basel, an einem Versuchsträger in Leipzig durch Willy Gehler sowie von Fritz von Emperger an einer Bogenbrücke aus umschnürtem Gusseisen vorgenommen. Die Versuche werden hier nicht näher beschrieben, weil sie nicht direkt den Betonbrückenbau behandeln. Dennoch hatten die Ergebnisse sicherlich einen gewissen Einfluss auf die Handhabung auch bei Massivbogen [vgl. Schürch 1916, S. 237–238].

⁴⁷⁹ In den Schweizer Vorschriften von 1909 steht, der Einfluss der Temperatur für Bauten im Freien sei mit $\pm 15^\circ \text{C}$ bezogen auf die mittlere Herstellungstemperatur zu berücksichtigen [Schweizerische Kommission des armierten Beton 1909, S. 186].

⁴⁸⁰ In Österreich in den Vorschriften von 1911 enthalten, mit bauteilstärkenabhängiger Abstufung. Vgl. Bemerkungen zu „Vorschrift vom 15. Juni 1911 über die Herstellung von Tragwerken aus Eisenbeton oder Stampfbeton bei Straßenbrücken“: „Die Wärmeschwankungen bei Hochbauten sind, wenn das Tragwerk dem Temperaturwechsel der Außenluft ausgesetzt ist, mit $\pm 15^\circ \text{C}$ zu berücksichtigen; (...) Für Straßenbrücken,

Temperaturdifferenz offiziell Berücksichtigung in den Regelwerken,⁴⁸¹ allerdings mit einer Abstufung ähnlich der von Emperger vorgeschlagenen. Im § 15. Abs. 2. ist bezüglich des Einflusses der Wärmeschwankungen Folgendes geregelt: „Bei rahmen- und bogenförmigen Tragwerken von großen Spannweiten sowie allgemein bei Ingenieurbauten muß der Einfluß der Wärme berücksichtigt werden, wenn dadurch innere Spannungen entstehen. Soll bei mittlerer Jahreswärme betoniert werden, so ist mit einem Wärmeunterschied von $\pm 15^\circ \text{C}$ zu rechnen. (...) Abs. 3. Bei Tragwerken, deren geringste Abmessung 70 cm oder mehr beträgt, und solchen, die durch Überschüttung oder sonst hinreichend geschützt sind, dürfen Wärmeschwankungen geringer, mit $\pm 10^\circ \text{C}$, in die Rechnung gestellt werden.“ [Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1916, S. 16–17].

In Einzelfällen ist bekannt geworden, dass man sich die Temperaturänderungen zu Nutze gemacht hat. So berichtet Max Leibbrand vom Bau des Cabin John Aqueduct in den USA,⁴⁸² dass diese im Winter fertiggestellt wurde. Aufgrund der Temperaturerhöhung im Laufe des Sommers habe sich der Bogen vom Lehrgerüst gelöst und man habe dieses ohne besondere Vorrichtung einfach entfernen können [Leibbrand 1906c, S. 456].

Neben den Temperatureinflüssen wirken sich auch Feuchtigkeitsänderungen der Umgebung auf die Gewölbe aus. Durch erhöhte Bewässerung z. B. durch Niederschläge, Schneeeauflage und Schlagregen quillt das Material, beim Trocknen schwindet es wiederum. Da diese Längenänderungen der Gewölbe aus den Feuchtigkeitseinflüssen im Vergleich zu den Temperatureinflüssen geringer sind, wurden sie in der Literatur weitgehend vernachlässigt. Es finden sich nur ganz vereinzelte Hinweise dazu. Zur Volumenbeständigkeit äußert sich beispielsweise Büsing in seiner Monographie zum Portlandzement: Bei der Durchtränkung von Steinen und Mörtel finde eine geringfügige Ausdehnung, sowie beim Austrocknen ein entsprechendes Schwinden statt. Des Weiteren bezeichnete er diese Volumenänderungen jedoch als äußerst gering [Büsing 1892, S. 24].

Ein weiteres Thema, das die Ingenieure für die Nutzungsdauer zu beachten hatten, waren die dynamischen Lasten auf einen Brückenbogen. Diese werden durch verschiedene Einflüsse hervorgerufen: in erster Linie durch die überfahrenden Fahrzeuge und deren Bremswirkungen – bei gekrümmten Brücken treten zusätzlich noch Fliehkräfte auf. Aber auch Witterungseinflüsse wie Sturm oder auch die bereits ausführlich besprochenen Temperatur- und Feuchteeinwirkungen bewirken eine dynamische Belastung. Das Problem dabei ist die Auflockerung des Materials unter einer wiederkehrenden Beanspruchung, die bei statischer oder einmaliger Anwendung zu keinerlei Schäden führen würde.

deren geringste Betonstärke mehr als 70 cm beträgt, oder welche vollständig mit Erde, Schotter u. dgl. wenigstens 70 cm hoch überdeckt sind, können die obigen Temperaturgrenzen auf $\pm 10^\circ \text{C}$ ermäßigt werden.“ [Saliger 1911, S. 345].

⁴⁸¹ Die Bestimmungen von 1908 enthielten keine Zahlenwerte. Es blieb den Ingenieuren selbst überlassen, wie sie die Temperaturspannung berücksichtigten. Dass das Ansetzen der reduzierten Schwankungen in Deutschland bereits weit vor 1916 Praxis war, zeigt beispielsweise die ausführlich beschriebene Tragwerksbemessung der Viadukte der Wieslauftalbahn (1908–1909), wo mit einer Temperaturänderung von $\pm 15^\circ \text{C}$ gerechnet wurde [Jori, Schaechterle 1911a, S. 35]. Für die Friedensbrücke in Plauen, 1903–04, waren beispielsweise noch 50°C angesetzt worden [Fleck 1904, S. 355].

⁴⁸² 1860–1862, Lichtweite von 67 m [Leibbrand 1906c, S. 485].

Ungünstige Erfahrungen aufgrund von Erschütterungen beschrieb beispielsweise Claus Köpcke. Bei aus Sandstein gebauten Eisenbahnbrücken haben die starken stoßweisen Belastungen vielfach schon zur gänzlichen Zerstörung geführt [Köpcke 1888, S. 378]. Der Stein sei zwar geeignet, größte Lasten zu tragen, allerdings sei seine Widerstandsfähigkeit gegenüber Erschütterungen vergleichsweise klein [Köpcke 1889, S. 270]. Beim Überfahren der Brücke durch einen Zug senke sich zuerst die belastete Gewölbehälfte, die entgegengesetzte steige.⁴⁸³ Unmittelbar im Anschluss kehre sich diese Bewegung um und es sei nicht verwunderlich, dass der Mauerwerksverband dadurch gelockert werde, Kanten abbrechen sowie ganze Quader zerstört werden [Köpcke 1889, S. 272]. Neben Verbesserungen im Eisenbahnbau⁴⁸⁴ empfahl Köpcke vor allem, den Brücken ein hohes Eigengewicht zu geben, um das Verhältnis von statischer zu dynamischer Last möglichst groß zu bemessen. Bei der Wahl der Bogenstärke sei den ungünstigen Einwirkungen aus dem Bahnverkehr dahingehend Rechnung zu tragen, dass möglichst nicht zu geringe Gewölbedicken gewählt werden. Auch Überschüttungen bewertete er als positiv [Köpcke 1889, S. 272].⁴⁸⁵ Aus diesen Gründen wählten die für den Bau der Viadukte der Wieslaufalbahn verantwortlichen Ingenieure Anton Jori und Karl Schaechterle geschlossene Bogenzwickel: Das Überbetonieren der Gewölbe biete *„den Vorteil, daß das Verhältnis von ruhender zu bewegter Last sich günstiger gestaltet, dynamische Wirkungen sich weniger fühlbar machen als bei einem durchbrochenen Aufbau.“* [Jori, Schaechterle 1911a, S. 28].

Durch Winddruck entstehen am Widerlager eine der Windrichtung entgegengesetzte Horizontalkraft sowie zwei Kämpfermomente. Emil Mörsch bezifferte die Horizontalkraft entsprechend dem Winddruck multipliziert mit der halben Ansichtsfläche. Die auftretenden Momente aus dem Wind drehten um eine vertikale bzw. eine horizontale Achse im Kämpfer [Mörsch 1900, S. 198]. Um diesen Kräften besser standhalten zu können, wurden Brückenbogen im Allgemeinen vom Scheitel zu den Kämpfern hin verbreitert. Ein Beispiel hierfür ist die Donaubrücke in Inzigkofen, deren Erbauer Max Leibbrand in einem Vortrag wie folgt erläuterte: *„Um die lange schmale Brücke gegen Winddruck widerstandsfähiger zu machen, wurde das Gewölbe so angelegt, dass seine Breite vom Scheitel bis zu den Kämpfern von 3,6 m auf allmählich 4,6 m zunimmt.“* [H. M. 1896, S. 7].

⁴⁸³ Vgl. beispielsweise die Beschreibung der Probelastung der Inzigkofener Donaubrücke „Eine Bewegung der Widerlager war nicht zu konstatieren, dagegen zeigte der Scheitel, solange die Walze im ersten Drittel des Gewölbes von dem Kämpfer her sich bewegte, eine Hebung um 0,1 mm, welche beim Passieren der Bruchfuge verschwand, um einer Senkung des Scheitels um 0,6 mm beim Uebergang der Walze über den Scheitel Platz zu machen. Es verblieb eine dauernde Senkung von rund 0,1 mm.“ [Leibbrand 1895/96, S. 76].

⁴⁸⁴ Verminderung der Vibrationen etwa durch Herstellung glatter Schienen, weniger Schienenstöße durch längere Schienteile, Verbesserungen im Eisenbahnoberbau, Übergänge zwischen Damm und Brücke usw. [Köpcke 1889, S. 273–274].

⁴⁸⁵ Vgl. auch Baurat Rheinhard, der für den Entwurf von Brücken empfahl, u. U. das Eigengewicht entsprechend zu vergrößern und dafür genügend hohe Sandschichten oder Beschotterungen aufzubringen [Rheinhard 1887, S. 326, S. 341].

6.3 Lösungsansätze durch Anpassungen in der Bautechnik

Wie zum Ende des Kapitels 6.2.1 bereits erläutert, lassen sich Formänderungen im Lehrgerüst durch dessen sorgfältige Bemessung und Ausführung zwar verringern, ganz ausschalten konnte man sie jedoch nicht. Um diese Verdrückungen während des Wölbens weiter zu reduzieren und deren Einflüsse zu kontrollieren, gab es neben der Weiterentwicklung der Gerüstkonstruktionen auch Bemühungen, den Bauablauf zu verbessern. Emil Winkler bezeichnete das Vorbelasten des Gerüsts als sehr wirksames Mittel, um die schädigenden Einflüsse aus den Formänderungen des Lehrgerüsts zu vermeiden oder wenigstens zu verringern [Winkler 1879; 1880, S. 59]. Eine daraus folgende Methode war diejenige, Werksteine mit offenen Fugen zu verlegen und diese erst nachträglich zu vergießen. Weiterhin entwickelten sich zwei grundsätzliche Methoden zur Minimierung der Bewegungen im Lehrgerüst: das Wölben in Abschnitten und das Wölben in Ringen. Die verwendeten Methoden, insbesondere auch in Hinblick auf deren praktische Anwendbarkeit im Mauerwerks- sowie im Betonbrückenbau werden im Folgenden genauer betrachtet.

6.3.1 Vorbelasten des Lehrgerüsts

Beim Vorbelasten wird eine dem späteren Eigengewicht des Bogens entsprechende Last auf das Lehrgerüst aufgebracht. Auf diese Weise wird die Form des Lehrgerüsts unter der endgültigen Last künstlich hergestellt. Dazu wurden bei Mauerwerksbogen die Gewölbesteine verwendet. Diese wurden vor Beginn der Wölbarbeiten auf das Lehrgerüst aufgebracht und durch auf der Schalung befestigte Knaggen gehalten [Barkhausen 1892, S. 326]. Die Belastung wurde je nach Ermessen des verantwortlichen Ingenieurs ein oder mehrere Tage aufrechterhalten [Schäffer, Sonne 1880, S. 237]. Die Wölbarbeiten erfolgten dann von den Kämpfern zum Scheitel steigend unter Verwendung der bereits auf der Schalung befindlichen Steine. Die Vorbelastung mittels des später zur Mauerung verwendeten Materials hatte den Vorteil, dass der Arbeitsaufwand beim Versetzen relativ klein war, dadurch dass die Steine in unmittelbarer Nähe ihres endgültigen Einbauortes auf die Schalung aufgesetzt wurden [Leibbrand 1883, S. 352]. Beim Bau von Mauerwerksbrücken wurde das Verfahren der Vorbelastung des Lehrgerüsts zum Ende des 19. Jahrhunderts standardmäßig angewandt.⁴⁸⁶ Das Handbuch der Ingenieurwissenschaften bezeichnete es als „*allgemeine und nie zu vernachlässigende Regel*“, den mittleren Teil und diesen bis möglichst weit zu den Kämpfern hin mit dem späteren Gewölbegewicht vorab zu beschweren [Barkhausen 1892, S. 326]. Der Stuttgarter Baurat August Rheinhard beschrieb im Rahmen des Baus der Murgbrücke in Heselbach seine Erfahrungen mit der Ballastierung des Lehrgerüsts. Demnach sei das Gerüst durch das ganze Gewicht der Gewölbesteine vorbelastet worden. Die dadurch hervorgerufene Scheitelsenkung des Lehrgerüsts betrug 4,5 cm. Vor Beginn der Wölbarbeiten wurde das Gerüst mittels Holzkeilen wieder in die richtige Lage gebracht

⁴⁸⁶ Hinweise auf Vorbelastungen des Lehrgerüsts insbesondere im Scheitel finden sich jedoch viel früher, z. B. [Gauthey, Navier 1813, S. 318–319], [Röder 1821, S. 305] oder 1854 bei [Bauernfeind 1854]. Hier ist auf Tafel 23 ein Bogen abgebildet, der im Scheitel mit einigen Steinen vorbelastet ist. Im erläuternden Text steht zu lesen, dass dies eine Möglichkeit sei, „wie man das Heben des Lehrgerüsts im Scheitel, das während des Wölbens der Schenkel öfters eintritt, durch Auflegen von Steinen zu verhindern sucht.“ [Bauernfeind 1854, Tafel 23].

und zusätzlich noch um 2,5 cm überhöht⁴⁸⁷ [Rheinhard 1887, S. 340]. Während das Vorbelasten des Lehrgerüsts im Mauerwerksbrückenbau zum Standard wurde, sprachen bautechnische Probleme gegen dieses Verfahren bei der Anwendung von Beton.

Das Aufkommen des Betons bei Massivbrücken brachte zwar dasselbe Problem der Lehrgerüstverformungen wie bei den Mauerwerksbrücken mit sich, allein der Aufwand der Vorbelastung war ein wesentlich höherer, da man nicht mit dem sowieso benötigten Wölbmaterial arbeiten konnte, sondern speziell dafür vorgesehene Lasten aufbringen musste (Abbildung 6.12). Man konnte zwar den für die Betonbereitung vorgesehenen Sand und Kies verwenden, aber da die Mischung des Betons nicht auf der Schalung stattfinden konnte, musste der gesamte Ballast wieder entfernt werden. Erst dann konnte gemischt und der Beton auf die Schalung befördert werden. Es erfolgten also zwei zusätzliche Transportvorgänge. Beispielsweise beschrieb Karl von Leibbrand den Aufwand für den Bau der Munderkinger Brücke über die Donau dahingehend, dass vor dem Beginn des Wölbens im Scheitel „*Kies und Eisenwerk*“ mit einem Gesamtgewicht von 25 t aufgebracht worden sei [Leibbrand 1894, S. 554]. Auch Max Leibbrand beschreibt die Vorbelastung des Lehrgerüsts der Donaubrücke Inzigkofen in ähnlicher Weise: „*Vor Beginn der Betonierung wurde das Lehrgerüst durch Aufbringen (...) einer großen Zahl Sandsäcke auf 6 m Länge und 3 m Breite im Scheitel mit im ganzen 40 000 kg beschwert.*“ [Leibbrand 1895/96, S. 75]. Während also das Vorbelasten des Lehrgerüsts bei Mauerwerksbrücken praktikabel und empfehlenswert war, so war dieses Verfahren bei Betonbogen – insbesondere bei sehr großen Spannweiten – nicht mehr geeignet. So ist z. B. vom Bau der Illerbrücken in Kempten überliefert, dass auf das Vorbelasten ausdrücklich verzichtet wurde, weil die dafür benötigten Massen zu groß und damit die Vorbelastung zu teuer gewesen wäre [Colberg 1906, S. 236]. Bei Betonbrücken setzten sich demnach andere Methoden durch, vgl. hierzu insbesondere die Erläuterungen im Kap. 6.3.4.

6.3.2 Offene Fugen und nachträglicher Verguss

Auch die Herstellung von Mauerwerksbogen mit vorübergehend offenen Fugen sollte die Rissbildung verhindern. Allerdings steckten hinter den verschiedenen Möglichkeiten der Anordnung der offenen Fugen grundsätzlich verschiedene Gedankengänge. Jean-Rodolphe Perronet, unter anderem Erbauer des Pont de Neuilly in Paris, bezeichnete es bereits 1773⁴⁸⁸ als die gebräuchliche Art, eine gewisse Anzahl der letzten Keilsteine trocken, also ohne Mörtel, zu versetzen, diese mit Holzkeilen mittels Schlägeln und eingeseiften Latten zu verspannen und die Fugen dann mit Kalk- und Zementmörtel auszufüllen und festzustampfen. Dies sei eine Möglichkeit, sowohl die Scheitelsenkung zu verringern als auch das Ausrüsten zu vereinfachen [Perronet 1777, S. 41]. Wenn man diese Aussage bewerten soll, dann zielt Perronet sicherlich nicht darauf, wie beim Vorbelasten die Verdrückungen im Lehrgerüst vorab herzustellen als vielmehr den Bogen vor dem Ausrüsten unter Spannung zu setzen und damit den Ausrüstvorgang praktikabler und unschädlicher zu machen. Dennoch: Die Perronetsche Aussage zeigt, dass das nachträgliche Vermörteln gang und gäbe war.

⁴⁸⁷ Zur Überhöhung vgl. Kap. 6.2.3.

⁴⁸⁸ Der Artikel ist mit 1773 datiert, publiziert wurde er 1777.

Auch Jules Dupuit beschrieb in seiner Monographie von 1870, dass sich die Konstrukteure seit langem bewusst seien, dass aufgrund der Bewegungen beim Ausrüsten der Druck in gewissen Fugen gegen den Intrados verschoben werde [Dupuit 1870, S. 193]. Mit Bezug auf eine Passage aus der Abhandlung von Perronet [Perronet 1793, S. 9, Absatz 18] beschrieb er, dass man mit Hilfe von Bossen diesen Druck einige Zentimeter vom Rand weg bewegen könne, indem man die Fugen am Rand öffne und diese nicht mit Mörtel ausfülle. Zusätzlich bildeten die Konstrukteure die Fugen auf der Seite größer aus, wo man das Schließen der Fuge erwarte. Auf diese Weise könne man nicht nur die Fuge regulieren und die späteren Bewegungen des Gewölbes kaschieren, man vergrößere auch die Dicke des Mörtels dort, wo der Druck verstärkt auftrete und vergrößere damit die Kontaktfläche [Dupuit 1870, S. 193–194]. Diese Kunstgriffe seien nach Kenntnis Dupuits die einzigen bisher ausgeführten [Dupuit 1870, S. 194].⁴⁸⁹

Im Gegensatz dazu steht eine vom Gedankengang der im Kap. 6.2.1 behandelten Vorbelastung des Lehrgerüsts ähnliche Methode. Es war diejenige, das Mauerwerk teilweise oder ganz mit offenen Fugen zu verlegen und diese nachträglich zu vermörteln. Dabei wurden die Quader zumindest der untersten Schicht sofort an ihre endgültige Stelle versetzt. Wie beim Vorbelasten wurde auch hier die Verformung des Lehrgerüsts künstlich herbeigeführt, solange die Bogenteile noch mehr oder weniger beweglich waren. Die Steine wurden dabei meist mit Holzkeilen oder -latten als Abstandshalter verlegt.

Wilhelm Housselle beschrieb das auftretende Problem in seinem Artikel „*Ueber die Ausführung von Gewölben*“ im Jahr 1878 [Housselle 1878a]. Zwar sei das starke Setzen beim Ausrüsten vermeidbar, man scheue jedoch die Risse, die bereits während des Wölbens auftauchen. Diese werden meist mit dünnflüssigem Zementbrei ausgegossen, was nach Housselle jedoch unsicher und zweifelhaft sei [Housselle 1878a, S. 510]. Dabei seien aber die Verdrückungen im Lehrgerüst zumindest bei großen Spannweiten nicht vermeidbar. Ohne weitergehende Vorkehrungen werden diese Risse immer auftreten. Sein Lösungsvorschlag ging dahin, die „Risse“ im Kämpfer absichtlich vorab herzustellen (Abbildung 6.13), jedoch in der Weise, dass man sie „*nachdem das Gewölbe im übrigen vollendet ist, jedoch noch vor dem Ausrüsten mit Sicherheit wieder schließen kann.*“ [Housselle 1878a, S. 510].⁴⁹⁰

Eine ganz ähnliche Ansicht vertrat Eugen Dyckerhoff beim Bericht über seine Dresdner Weißeritzbrücken bei der Verhandlung des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten im Jahr 1893. Dort beschrieb er den Auslöser für seine Überlegungen: Er habe beim Bau einer Werksteinbrücke, deren Kämpferfugen bereits mit Zementmörtel vergossen gewesen seien, beobachtet, dass sich mit zunehmender Belastung der Lehrbogen diese Kämpferfugen am Extrados bis zu 10 mm öffneten, trotzdem das Lehrgerüst stark vorbelastet gewesen sei. Diese Fugen mussten dann erneut vergossen werden. Dyckerhoff hingegen baute seine Brücken in der Art, dass er an den Kämpfern oberseitig im Bogen Lücken ließ, die er erst nach dem Schluss des Bogens ausbetonierte

⁴⁸⁹ Original: „Ces artifices sont les seuls qu'à notre connaissance, les constructeurs aient employés jusqu'à présent.“

⁴⁹⁰ Beim Bau der Dracbrücke in Claix (1874) war eine ähnliche Variante bereits ausgeführt worden [Cendre 1879, S. 15]. Nach Aussage von Housselle habe er erst nach dem Verfassen seiner Abhandlung davon erfahren [Housselle 1878a, S. 511].

(Abbildung 6.14). Damit wolle er verhindern, „*dass ein Loslösen des Bogens von den Widerlagern durch ein weiteres Setzen der Verschalung in Folge der sehr starken Belastung durch das Gewölbe*“ stattfinde. Eine freie Bewegung des Bogens sei auf diese Weise möglich [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1893, S. 110].

Karl von Leibbrand beschrieb eine ähnliche Ausführungsweise, bei der er allerdings an den Kämpfern und im Scheitel jeweils einige durchgehende Reihen des Mauerwerks trocken verlegte und diese erst nachträglich verschloss. Die Quader seien auf Latten bzw. Gummischnüren gelagert worden. Jede Gewölbeschicht sei danach im Ganzen vergossen worden, außer den trocken verlegten Schichten im Scheitel und den jeweils drei Reihen in den Kämpfern: „*Im Scheitel wurden die letzten 8 Schichten gleichzeitig vergossen; zu gleicher Zeit erfolgte auch das Ausgießen der trocken versetzten Schichten an den Kämpfern.*“ [Leibbrand 1883, S. 354].

Noch weiter ging die Verlegung der gesamten Gewölbequader mit gänzlich offenen Fugen. August Rheinhard⁴⁹¹ berichtete im Rahmen seines Artikels zur Murgbrücke in Heselbach (1886) von diesem Verfahren: „*Die Steine (...) wurden auf die Schalung im Verband derart aufgebracht, dass die Fugenweite durchschnittlich 2,5 cm betrug (...). Jeder Stein wurde überdies gegen den nächsten mittels je zweier etwa 2 cm hohen, 4–5 cm langen Holzklötzchen unten und oben auseinander gehalten.*“ [Rheinhard 1887, S. 340].⁴⁹² Nachfolgend wurden die Fugen mit steifem Zementmörtel ausgefüllt und ausgestampft. Dabei wurden jeweils zwei Reihen an den Kämpfern freigelassen. Diese wurden erst ganz am Schluss ergänzt. Auf diese Weise könne ein vollkommen zusammenhängender, elastischer Bogen erstellt werden [Rheinhard 1887, S. 340].

Die Denkweise ist, wie bereits erwähnt, dieselbe wie beim Vorbelasten des Lehrgerüsts. Wilhelm Housselle bezeichnete diese Vorgehensweise, den Bogen komplett mit offenen Fugen zu verlegen, im Handbuch für Baukunde dementsprechend als „*äusserste Grenze, bis zu welcher man dies vorläufige Belasten der Lehrgerüste treiben kann*“ [Barkhausen 1892, S. 326]. Als Beispiel führte er den Pont de Tilsitt in Lyon⁴⁹³ an. Erst nach dem Versetzen sämtlicher Wölbsteinschichten seien diese vergossen worden. Sein Resümee: „*Wenn man das Vergießen überhaupt billigt, so ist jedenfalls anzuerkennen, dass hierdurch Formveränderungen im Gewölbe vor dem Ausrüsten vermieden werden.*“ [Barkhausen 1892, S. 326]. Das Verlegen mit gänzlich offenen Fugen wurde zumindest bei Werksteinbogen

⁴⁹¹ Nach Aussage von Max Leibbrand war Rheinhard einer der Pioniere dieser Methode: „Rheinhard (Stuttgart) hat in Deutschland zuerst in größerem Umfange die Wölbung mit offenen Fugen angewendet und eingehend begründet.“ [Leibbrand 1906c, S. 457].

⁴⁹² Auch Karl von Leibbrand beschrieb die Vorgehensweise in seiner Abhandlung zu den Steinbrücken großer Spannweite: „Nun wurden die Gewölbequader von den Kämpfern nach dem Scheitel fortschreitend geordnet auf Fugenhölzer versetzt, und hernach (...) sämtliche Fugen mit trocken gehaltenem Zementmörtel (...) gefüllt und mit Flacheisen ausgestossen; die Holzschienen konnten alsdann ausgezogen werden (...). Die Gewölbfugen dürfen nicht unter 20 mm weit gemacht werden, damit sie recht satt und sicher mit Zementmörtel gefüllt und ausgestossen werden können“ [Leibbrand o. J. (1894), S. 7].

⁴⁹³ Eine Beschreibung der Vorgehensweise beim Pont de Tilsitt findet sich hier: „Pour la construction de ces voûtes, on a employé le procédé suivant: – Les deux premier rangs de voussoirs ont été posés sans mortier, et ils ont été assujettis dans leur emplacement définitif au moyen de liteaux en sapin, de 0^m.008 d'épaisseur (largeur donnée à tous les joints). Lorsque les voûtes ont été complètement terminées, on a coulé du ciment dans les joints laissés vides aux naissances; et aussitôt après on a rempli les reins de la voûte en béton maigre.“ [Morandière 1891, S. 191].

häufig ausgeführt.⁴⁹⁴ Ein weiterer großer Vorteil dieses Verfahrens war die Möglichkeit, vor dem Ausrüsten die geplante Bogenform wiederherzustellen. Dazu seien nach Aufbringen der Steine die Lehrbogen um die gemessene Einsenkung zuzüglich der vorgesehenen Überhöhung wieder anzuheben [Rheinhard 1887, S. 340].⁴⁹⁵ Als Nachteil ist zu werten, dass nach dem Vermörteln der offen gelassenen Fugen bis zum Ausrüsten noch gewartet werden musste, bis dieser nachträglich eingebrachte Mörtel genügend Festigkeit erlangt hatte [Winkler 1879; 1880, S. 60]; bei der schnellen Erhärtung des Portlandzementes war dieses Problem jedoch untergeordnet.

Entscheidend in der Überlegung war, ob die Lücken oder offenen Fugen im Gewölbe vor oder nach dem Ausrüsten gefüllt wurden. Die bisher beschriebenen Verfahren sehen allesamt eine Vermörtelung vor dem Ausrüsten vor. Sie sind also durchgängig für die Kontrolle der Verdrückungen im Lehrgerüst gedacht. Mit demselben Ziel, also der Rissvermeidung, jedoch mit einem anderen Gedankengang befassen sich die Verfahren mit nach dem Ausrüsten zu schließenden Fugen.

Beispiele für Lösungsansätze mit Vermörteln nach dem Ausrüsten geben Otto Intze oder auch Gustav Tolkmitt: Otto Intze beschrieb anlässlich einer Rezension zur „*Baukonstruktionslehre für Ingenieure*“ von Wilhelm Frauenholz [Frauenholz 1875] im Jahr 1876 seine Beobachtungen beim Ausrüsten von Massivbrücken. Durch das Zusammenpressen des Materials, der Widerlager und des Untergrundes komme es beim Ausrüsten stets zu einem gewissen Ausweichen der Kämpfer, das häufig zur Rissbildung führe. Insbesondere bei großen Spannweiten bilden sich derartige Schäden. Er schloss aus den Rissen, dass, wenn diese bis zur halben Bogendicke reichen, an diesen Stellen die Stützlinie in 1/6 der Gewölbstärke angreifen müsse. Dadurch sei weitere Rissbildung bis zum Lösen einzelner Steine möglich. Es sei daher „*dringend zu empfehlen, die Stützlinie zu zwingen, dass sie eine gewisse Grenzlage nicht überschreiten kann.*“ [Intze 1876, S. 378]. Zu diesem Zweck könne man das Gewölbe im Scheitel am Bogenrücken und in den Kämpfern an der inneren Laibung bis zu einem Drittel der Bogendicke aussparen (Abbildung 6.15). Zusätzlich könne man im Bereich der Aussparungen höherwertiges Material verwenden. Erst nach dem Ausrüsten seien diese Lücken zu füllen [Intze 1876, S. 378].

Beim Bau der Brücken von Köpenick wandte Gustav Tolkmitt ein entsprechendes Verfahren an. Dazu ließ er zwei benachbarte Läuferschichten im Scheitel am Bogenrücken frei, in den Kämpfern jeweils eine Schicht an der inneren Laibung.⁴⁹⁶ Zusätzlich sparte er noch einige der oberen Schichten an den Kämpfern aus (Abbildung 6.16). Obwohl die Ausrüstung bereits drei Tage nach dem Schluss des Gewölbes stattgefunden habe, habe

⁴⁹⁴ Vgl. beispielsweise die Aussagen von Max Leibbrand und Gottfried Koll: „Ebenso wird bei Quadergewölben verfahren, wofür die großen, in den Jahren 1899 bis 1901 erbauten Brücken der badischen Staatsbahn über die Gutach und den Schwändeholzobel und die neuen, von Sager u. Wörner erstellten Brücken über die Isar in München vorzügliche Beispiele geben“ [Leibbrand 1906c, S. 457]. Kolls Aussage erfolgt im Zusammenhang mit Gewölben aus Haustein: „Die Gewölbe werden mit offenen Fugen ausgeführt. Jeder Stein wird durch etwa 2 cm starke Klötzchen von dem nächsten getrennt. In die Fuge wird der Mörtel aus Zement mit Sandzusatz gegossen und mit schmalen Eisen festgestampft. Dann werden die Klötzchen entfernt und die verbliebenen Öffnungen mit Mörtel nachgefüllt.“ [Koll 1908, S. 70].

⁴⁹⁵ Zur Überhöhung vgl. Kap. 6.2.3. Weiterer Hinweis beispielsweise bei [Koll 1908, S. 73].

⁴⁹⁶ Die in Abbildung 6.16 erkennbare oberseitige Lücke am rechten Kämpfer wird im Text nicht beschrieben.

sich weder während des Wölbens noch beim Ausrüsten ein Riss gezeigt [Tolkmitt 1892, S. 362–363].

Nachteile des nachträglichen Schließens der Fugen sind, dass in den reduzierten Bogenquerschnitten eine starke Druckspannung auftritt und dass auch nach dem Verfüllen der Fugen zumindest hinsichtlich des Eigengewichts lediglich der reduzierte Bereich wirksam ist. Zusätzlich sei das Verfüllen an der Innenlaibung des Bogens bautechnisch schwierig [Melan 1911, S. 197].

Im Vergleich der Vermörtelung vor bzw. nach dem Ausrüsten lässt sich zusammenfassen: Mit der ersten Methode stellte man gewissermaßen die befürchteten Risse während des Bauablaufes absichtlich her und vermörtelte sie vor dem Ausrüsten. Dies diene also der Unschädlichmachung der Verdrückungen im Lehrgerüst. Die nachträgliche Vermörtelung hatte das Ziel, die Stützlinie zu kontrollieren.⁴⁹⁷ Bauzeitlich wurde das Vermörteln vor dem Ausrüsten bevorzugt: Emil Winkler beispielsweise beschreibt in seinem Artikel zur Lage der Stützlinie beide Varianten. Zum Schließen der Fugen vor dem Ausrüsten resümiert er: „*Meiner Meinung nach ist dieselbe der vorigen vorzuziehen.*“⁴⁹⁸ [Winkler 1879; 1880, S. 59–60].⁴⁹⁹

Bei der Verwendung von Bruchsteinen oder Beton war die Verlegung mit offenen Fugen wiederum nicht praktikabel. Joseph Melan schrieb in dem Band „*Steinerne Brücken und Brücken aus Beton und Eisen*“ über diese Ausführung: „*Bei Bruchsteingewölben ist diese Ausführungsart mit trocken versetzten Steinen und nachträglichem Ausstampfen oder Vergießen der Fugen wegen der Unregelmäßigkeit der Steine nicht anwendbar.*“ [Melan 1911, S. 196]. Auch hier konnte sich der Standard aus dem Mauerwerksbrückenbau bei Verwendung von Stampfbeton und Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise nicht durchsetzen.

6.3.3 Wölben in Ringen

Eine weitere Ausführungsweise von Gewölben ist das Herstellen des Baukörpers in konzentrischen Ringen. In einem 1838 in der Allgemeinen Bauzeitung veröffentlichten Artikel über seine Eindrücke auf einer Englandreise beschrieb ein gewisser Emil Flaminus

⁴⁹⁷ Vgl. Housselles Äußerung zu beiden Verfahren: „Ueberhaupt sind die Zwecke, welche beide Vorschläge verfolgen, verschieden. Das zuletzt erwähnte Verfahren ist bestimmt, der Mittellinie des Drucks im Gewölbe eine gewisse Richtung zu geben, das zuerst beschriebene (mein Verfahren) bezweckt nur eine tadellose Fertigstellung des Gewölbes als eines ununterbrochenen gekrümmten elastischen Stabes, welchen man dann dem Widerstand gegen äussere Kräfte überlässt, indem man zu der Annahme berechtigt ist, dass die Gesetze der Elastizitätslehre bei einem solchen Stabe vollkommen zur Geltung gelangen werden.“ [Housselle 1878a, S. 510].

⁴⁹⁸ Vgl. hierzu auch die Bewertung im Handbuch der Ingenieurwissenschaften: „Es ist schwer zu entscheiden, welcher der Methoden a. und b. [Vermörteln nach oder vor dem Ausrüsten, Anm. d. Verf.] etwa der Vorzug zu geben sei. (...) Es scheint demnach dem zweiten Verfahren der Vorzug zu gebühren, obwohl dabei den Folgen der Formänderung des Gewölbes nach dem Ausrüsten nicht mit Sicherheit entgegengetreten werden kann.“ [Schäffer, Sonne 1886, S. 336].

⁴⁹⁹ Ein weiteres, jedoch nur im Einzelfall benanntes Ziel der offenen Fugen war, beim Beton die Schwinderscheinungen zu kontrollieren. Fritz von Emperger erwähnt dies in seinem Handbuch für Eisenbetonbau [Emperger 1932, S. 145]. Da dieses Verfahren jedoch beinhaltet, dass die Fugen bis zum vollständigen Abbinden des Betons offen gehalten werden müssen, kann dies in der Praxis wohl nicht als Standardfall bewertet werden.

die Bauweise englischer Ziegelbrücken dieser Zeit: Die Eisenbahnstrecke London–Bristol führte in Hanwell, etwa 15 km westlich der Hauptstadt, über ein morastiges Tal, aufgrund dessen eine neunbogige Brücke mit Lichtweiten bis zu 70 Fuß (etwa 21 m) notwendig wurde (Abbildung 6.17). Für den Bau verantwortlich war Isambard Kingdom Brunel. Das Gewölbe beschrieb Flaminius wie folgt: „*Nach der in England allgemein üblichen Konstruktionsweise der Wölbungen, selbst bei den bedeutendsten Dimensionen derselben, ist jeder Brückenbogen in 8 konzentrischen, einen halben Ziegel starken Ringen zusammen gewölbt, welche ohne Verband untereinander gleichzeitig aufgeführt werden (...)*.“ [Flaminius 1838, S. 59]. Auch wenn der deutsche Architekt diese Bauweise verwerflich finde, verwenden die englischen Baumeister diese gerade dort, wo hohe Ansprüche an Festigkeit und Widerstandsfähigkeit bestehen. Zur Begründung der Vorteile führte er an, dass das Lehrgerüst sehr viel leichter ausgeführt werden könne und dadurch weniger Holz benötigt werde, das in England noch bedeutend teurer sei als auf dem Kontinent [Flaminius 1838, S. 59–60]. Die leichtere Ausführung des Gerüsts werde dadurch erreicht, dass man den ersten Ring nach dessen Fertigstellung bereits zur Unterstützung der folgenden Schichten heranzog. Ein weiterer Vorteil insbesondere bei der Verwendung von Ziegeln sei jedoch der Verzicht auf Formsteine, die die verschiedenen Radien ausgleichen konnten [Schäffer, Sonne 1886, S. 317].

Dass allerdings die Ringe wirklich einzeln und völlig ohne Verband gebaut wurden, mag bezweifelt werden. Von Unruh beanstandete 1854, dass die Aussage, in England werde in voneinander unabhängigen Ringen gewölbt, falsch sei. Er habe sich selbst vor Ort davon überzeugt, dass im Gewölbeinneren ein ordentlicher Verband gemauert werde. Lediglich die Stirnen seien so ausgeführt, dass sie die Optik einzelner Ringe aufweisen [Unruh v., Benda 1854, S. 501–502]. Die Ausführung unabhängiger Schichten bezeichnete er gar als absurd: „*Es ist sogar behauptet worden, dass die Engländer die Ringe einzeln wölbten und dadurch mit viel schwächeren Rüstungen auskämen. Man kann schon a priori eine solche Absurdität dem englischen Ingenieur nicht zutrauen (...)*.“ [Unruh v., Benda 1854, S. 502].

Jules Dupuit sprach sich in seinem „*Traité de l'équilibre des voûtes*“ für die Verwendung von Ringen aus. Wenn man den Extradados der jeweiligen Schichten gerade ausbilde, biete das Wölben in Ringen zweifelsohne ebenso alle Missstände wie die Ausführungsweise der Rollschichten beim Ziegelmauerwerk. Wenn man dort jedoch seine natürlichen Unregelmäßigkeiten belasse, so könne der Verband beim Komplettieren der Bogendicke ebenso eng hergestellt werden wie wenn man ihn in einem Stück baue.⁵⁰⁰ Er empfehle dieses Verfahren jedoch lediglich für große Bogen, deren Lehrgerüste immer nachgiebiger seien als bei kleinen [Dupuit 1870, S. 283; Abbildung 6.18].

Zu den Nachteilen dieses Verfahrens gibt es zahlreiche Äußerungen. Mehrtens bezeichnete in dem von ihm bearbeiteten Teil des Handbuchs der Ingenieurwissenschaften 1899 die Herstellung von Gewölben aus mehreren Ringen allein vom theoretischen Standpunkte als nicht empfehlenswert. Er begründete diese Aussage damit, dass die schon beim einfachen Gewölbe vorliegende dreifache statische Unbestimmtheit bei Anwendung mehrerer Ringe

⁵⁰⁰ Original: „*Sans doute si l'extrados provisoire qui s'établit dans cette manière de procéder était uni et destiné à former joint, ce système présenterait tous les inconvénients des rouleaux de briques, mais si on le laisse avec ses irrégularités naturelles, la liaison et l'enchevêtrement qui se font lorsqu'on complète l'épaisseur de la voûte, sont aussi intimes que si on l'avait fait d'un seul jet.*“

noch bedeutend erhöht werde [Landsberg 1899, S. 283].⁵⁰¹ Es sei kaum realisierbar, mehrere unabhängige Ringe derart auszuführen, dass jeder den ihm rechnermäßig zufallenden Teil der Last auch trage; der jeweils längere Bogen trage dagegen den Großteil [Mehrtens 1885, S. 490]. Jedoch seien die weiter oben bereits beschriebenen baupraktischen Vorteile insbesondere bei großen Lichtweiten oft vorherrschend, so dass in diesen Fällen das Verfahren angewendet werden könne. Es müsse aber für einen guten Verband zwischen den Schichten gesorgt werden [Landsberg 1899, S. 283–284].

Dementsprechend gab es eine rege Diskussion um die grundsätzliche Anwendbarkeit des Wölbens in Ringen. Krone, königlicher Baurat a. D. aus Berlin, bezog sich in einem 1898 gehaltenen Vortrag⁵⁰² auf E. H. Hoffmann, der die Ausführung in Ringen für leistungsfähiger erachtete als die in der vollen Stärke hergestellten Bogen. Durch die Ersparnisse im Lehrgerüst seien diese damit auch kostengünstiger [Krone 1898, o. S.]. Hoffmann behauptete, dass die durchgehenden konzentrischen Fugen, die zweifelsohne eine Schwächung des Bogens darstellen, weit weniger schädlich wirken als die in großer Anzahl vorhandenen radialen Fugen beim üblichen Mauerwerksverband, zudem diese zumeist in veränderlicher Dicke vorhanden seien, wenn nicht Formsteine verwendet werden. Zudem sei ein dünner Bogen sehr viel leichter in guter Qualität herzustellen als einer in großer Stärke [Krone 1899, S. 270].

Für die 1893–1894 errichtete k. k. Staatsbahn Stanislau–Woronienka⁵⁰³ wurden mehrere Flussüberquerungen benötigt. Herausragend ist dabei die Pruth-Brücke bei Jaremcze mit einer bis dahin im Eisenbahnbrückenbau nicht erreichten Lichtweite von 65 m. Die Ausführung der Gewölbe wurde dahingehend beschrieben, dass *„einerseits vermieden wird, die Lehrgerüste durch längere Zeit der Einwirkung sehr schwerer Lasten auszusetzen und daß andererseits das Gewölbemauerwerk von Schäden bewahrt bleibt, welche durch das Nachgeben der Gerüste unter der wachsenden Last der Wölbsteine einzutreten pflegen.“* [Huss 1893, S. 546]. Aus diesen Gründen seien die großen Gewölbe in zwei verzahnten Ringen ausgeführt. Dabei seien zuerst die Steine der unteren Schicht mit offenen Fugen verlegt worden. Nach Beendigung dieses Vorgangs wurde an mehreren Stellen gleichzeitig der Mörtel eingestampft. Nach Ablauf von etwa zwei bis drei Wochen wurde dann der zweite Ring aufgemauert [Huss 1893, S. 546].

Auch beim Bau der Albulabahn (Eröffnung 1903) wurde das Wölben in Ringen angewendet. Die Gebirgsbahn erforderte zwischen Thusis und Filisur neben zahlreichen Tunnels auch 26 Brückenbauten [Reckenschuß 1903, Tafel II]. Der Bahnbau, insbesondere die herausragenden Konstruktionen, Solisbrücke und Landwasserviadukt, wurden in mehreren Abhandlungen ausführlich beschrieben. Die genannten Bauwerke führten über sehr tiefe Einschnitte, so dass die Ausbildung der Lehrgerüste eine bautechnische Herausforderung darstellte. Der Hauptbogen der Solisbrücke überspannt die 85 m tiefe

⁵⁰¹ In seinem Artikel von 1885, in dem im Wesentlichen alle hier beschriebenen Punkte bereits enthalten sind, begründete er seine Meinung mit der ungewissen Lage der Stützlinie, die im Vergleich zum einfachen Gewölbe bei einem aus mehreren Ringen bestehenden noch erheblich wachse [Mehrtens 1885, S. 490].

⁵⁰² Abschrift erhalten im Stadtarchiv Holzwinden: [Krone 1898]. Ähnlich zu dem publizierten Artikel [Krone 1899].

⁵⁰³ Heute Woronenka–Iwano-Frankiwsk in der Ukraine.

DER EINGESPANNTE BOGEN

Albulaschlucht mit einer Lichtweite von 42 m (Abbildung 6.19).⁵⁰⁴ Aufgrund der großen Bauhöhe war eine Zwischenstützung des Lehrgerüsts nicht umsetzbar. Dieses wurde dementsprechend als freigesprengtes System ausgeführt. Das Gewölbe wurde in drei verzahnten Ringen aus Mauerwerk erstellt. Dabei wurden die Ringe nacheinander in Abständen von etwa zehn Tagen geschlossen [N. N. 1904c, S. 31]. Es ist davon auszugehen, dass die Rahmenbedingungen mit dem freigesprengten 42 m weiten Gerüst die Wahl der Bauweise in Ringen wesentlich beeinflusste, auch wenn keine der Beschreibungen dies explizit benennt.⁵⁰⁵

Genannte Beispiele zeigen recht deutlich den Rahmen der Anwendung des Wölbens in Ringen: Sinnvoll eingesetzt werden konnte diese Bauweise bei Mauerwerksbrücken, wenn größere Verdrückungen im Lehrgerüst erwartet wurden, namentlich bei großen Spannweiten sowie bei schwierigen Randbedingungen für die Konstruktion des Lehrgerüsts.

Bei der Verwendung des Baustoffes Beton herrschte jedoch eine gegensätzliche Meinung zum Wölben in Ringen: In diesem Zusammenhang wurde die Bauweise überwiegend als wenig geeignet angesehen. Der Grund hierfür lag hauptsächlich darin, dass der Verband zwischen den Schichten wesentlich schwieriger hergestellt werden konnte als bei Bauwerken aus Mauerwerk [Beutel 1903; 1904, S. 3].⁵⁰⁶ Bedingt durch die Materialeigenschaften, insbesondere das Schwinden des Betons wurde jeweils der unterste Ring höher belastet als die folgenden [N. N. 1899b, o. S.].⁵⁰⁷ Ein weiterer Nachteil war, dass der Beton in den unteren Schichten nicht ruhig abbinden konnte, sondern durch das Feststampfen des folgenden Ringes hierin gestört wurde [Binswanger 1903, S. 307]. Längeres Abwarten bis zum vollständigen Erhärten der Schichten hätte hingegen zu stark verlängerten Bauzeiten geführt.

Auch erwartete Einsparungen durch die leichtere Ausführung des Gerüsts haben sich nicht bestätigt, konstatierte Max Leibbrand in seinem Artikel „*Fortschritte im Bau weitgespannter massiver Brücken*“ aus dem Jahre 1906: Dadurch dass man höhere Sicherheitskoeffizienten für das Gewölbe benötige und daher die Gewölbestärke vergrößere, hebe sich die Ersparnis für das Lehrgerüst wieder auf [Leibbrand 1906a, S. 596]. Georg Gilbrin, der die Zusammenhänge von Rissbildungen und deren Vermeidung ausführlich untersucht hatte, resümierte: „*Das sogenannte Wölben in Ringen (...) wird*

⁵⁰⁴ Siehe auch Abbildung 6.20 und Abbildung 6.21: Dort sind im Plan die drei Ringe des Wiesener Viaduktes eingezeichnet, die Fotografie zeigt die Erstellung des ersten Ringes.

⁵⁰⁵ Ein weiteres Beispiel, bei dem das Wölben in Ringen ausführlich beschrieben wird, ist die Höllentalbahn zwischen Neustadt und Hüfingen im Schwarzwald (eröffnet 1901). Die bekanntesten Bauwerke sind die 64 m weite Gutachbrücke und die nur wenig kleinere, 57 m weite Schwändeholztobelbrücke [Moser 1901].

⁵⁰⁶ Vgl. beispielsweise die Aussage von Ferdinand Beutel, der für den Bau der Illerbrücken in Lautrach und Kempten verantwortlich war: „Die Ausführung der Gewölbe geschieht nicht in geschlossenen konzentrischen Ringen, weil hiebei die einzelnen Ringe die gewünschte feste Verbindung unter sich kaum erhalten können, und weil insbesondere durch die ständige und elastische Einbiegung des Lehrgerüsts die unteren, bei fortschreitender Arbeit allmählich erhärtenden Ringe leicht springen und reißen und hiebei in ihrer Festigkeit grosse Einbusse erleiden.“ [Beutel 1903; 1904, S. 3].

⁵⁰⁷ Vgl. beispielsweise: „Die Herstellung von Gewölben durch konzentrische Ringe, welches Verfahren empfohlen wurde, ist jedenfalls fehlerhaft, wenn damit das Lehrgerüste entlastet werden soll. Es wird dann der innere Gewölbering erheblich mehr beansprucht als der äussere, und es wird die Pressung am Kämpfer noch ungünstiger als bei der Herstellung der Gewölbe ohne Gelenke.“ [N. N. 1899b, o. S.].

manchmal unter jenen Maßnahmen aufgeführt, welche die Störungen einschränken sollen. Bedenkt man jedoch, daß die spezifische Beanspruchung des Lehrgerüsts bei der Anwendung dieses Verfahrens gegenüber den gebräuchlichen Werten meist gar nicht herabgesetzt wird, da man das Lehrgerüst eben entsprechend der geringeren Belastung schwächer ausbildet, ferner daß neue unberechenbare Nebenspannungen in das aus mehreren Ringen, ob mit oder ohne innige Verbindung unter sich, zusammengesetzte Gewölbe kommen, so erkennt man, daß das Wölben in Ringen im allgemeinen nicht sehr geeignet erscheint, die Erreichung des normalen Zustandes des Gewölbes zu fördern.“ [Gilbrin 1913, S. 26].⁵⁰⁸

6.3.4 Wölben in Abschnitten

Die bisher beschriebenen Maßnahmen waren beim Einsatz des Materials Beton nur bedingt anwendbar. Wie in den betreffenden Kapiteln 6.3.1 bis 6.3.3 bereits erläutert, ließ sich gegen das Vorbelasten des Lehrgerüsts der hohe Transportaufwand für den Ballast anführen. Gegen die Verlegung der Wölbsteine mit offenen Fugen sprach, dass das nachträgliche Vermörteln bei unregelmäßigen Steinen nicht möglich war und gegen das Wölben in Ringen in erster Linie das Problem der mangelhaften Möglichkeiten, die Ringe untereinander zu verzahnen. Das grundsätzliche Anliegen – also die Vermeidung bzw. Minimierung der Verdrückungen im Lehrgerüst – blieb jedoch bestehen. Es mussten an den Stampfbetonbau angepasste Bauweisen gefunden werden.

Im Jahre 1844 erstellte man einen Probebogen, um aus dessen Ausführung Erkenntnisse für den geplanten Bau des Pont-aux-Doubles in Paris zu gewinnen.⁵⁰⁹ Dieses Versuchsbauwerk hatte mit einer Lichtweite von 31 m die gleichen Abmessungen wie die geplante Brücke, lediglich die Breite wurde reduziert. Ein Jahr nach der Fertigstellung setzte man den Bogen zahlreichen Belastungsversuchen aus, denen der Bogen perfekt standhielt [Caudel, Laroque 1859, S. 418–420]. Jedoch stellten die verantwortlichen Ingenieure Gariel und Garnier fest, dass die Verwendung von Zement und dessen schnelle Erhärtung das Problem der Rissbildung verschärften [Caudel, Laroque 1859, S. 419].⁵¹⁰

Diese Erfahrungen führten zu einer Anpassung beim Bau des Pont-aux-Doubles (1847). Es wurden während des Baus des Bogens Lücken freigelassen,⁵¹¹ zwei an den Kämpfern, zwei bei den Bruchfugen und eine im Scheitel (Abbildung 6.22). Auf diese Weise wurde der

⁵⁰⁸ Im Rahmen der Beschreibung der Bauarbeiten zur Isonzobrücke bei Salcano fällt das Resümee auch bei Verwendung von Mauerwerk deutlich gegen das Wölben in Ringen aus. Die Einsparungen beim Lehrgerüst gehen auf Kosten der Qualität des Gewölbes und deshalb „wird der Schluß gestattet sein, daß als Richtschnur des modernen Steinbrückenbaues der Grundsatz gelten sollte, das ‚Wölben in Ringen‘ nach Tunlichkeit zu vermeiden!“ [Örley 1910, S. 530]. Ebenso bei der Addabrücke, Morbegno: „Bisher war es allgemein üblich, die Gewölbe in einzelnen Ringen, sei es mit, sei es ohne Verzahnung, derart herzustellen, daß erst nach vollständiger Fertigstellung des ersten Ringes der zweite und gegebenenfalls [sic] die folgenden Ringe zur Ausführung gelangten, ein Verfahren, welches zwar gestattet, das Lehrgerüst schwächer zu gestalten, als wenn es das volle Gewicht des ganzen Gewölbes aufzunehmen hätte, das aber keine Gewähr dafür bietet, daß die durch die Belastungen hervorgerufenen Spannungen sich gleichmäßig auf die einzelnen Ringe verteilen.“ [Wolff 1903, S. 480].

⁵⁰⁹ Vgl. Kap. 4.2 und 4.4.

⁵¹⁰ Vgl. Kap. 4.2 und 6.2.2.

⁵¹¹ Vgl. hierzu Kap. 4.2.

Bogen in vier voneinander getrennten Abschnitten⁵¹² erstellt. Diese konnten sich bis zur Fertigstellung voneinander unabhängig bewegen, erst danach wurden die Leerstellen verfüllt. Während des Ausrüstens konnte man keinerlei Risse feststellen [Claudel, Laroque 1859, S. 418–420].

Während bei Mauerwerksbrücken diese Aufteilung, also von den Kämpfern und den Mitten der Bogenschenkel Richtung Scheitel, noch mehrfach ausgeführt wurde,⁵¹³ entwickelte sich im Folgenden und insbesondere bei der Verwendung von Beton die Methode weiter. Bezug nehmend auf den Bau der Weißeritzbrücken⁵¹⁴ in Dresden beschrieb Eugen Dyckerhoff im Rahmen der Hauptversammlung des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten im Jahr 1893 folgendes Vorgehen: Der Bogen mit einer Stützweite von rund 20 m wurde in neun Abschnitte aufgeteilt (Abbildung 6.14), diese gehen über die ganze Gewölbebreite. Es seien die Abschnitte mit der Nr. 2 zuerst eingestampft worden, *„damit das Setzen bzw. Zusammendrücken der aus Holz hergestellten Verschalbögen, sog. Lehrbögen, soviel als möglich stattfinden konnte, ehe der Gewölbebogen in grösserer Ausdehnung verfertigt wurde.“* [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1893, S. 110]. Es wurde also mit dem ersten bzw. mit einem der ersten Abschnitte der Scheitel des Lehrgerüsts vorbelastet, um das Heben desselben zu verhindern (Abbildung 6.23). Der Grundgedanke beim Bauen in Abschnitten war also letztlich derselbe wie beim Vorbelasten, nur dass der Transportaufwand für den Ballast wegfiel.⁵¹⁵ Auch Büsing beschrieb die Vorteile des Beginns im Scheitel: *„Denn einmal wird beim Anfang im Scheitel die Zuführung des Betons oder der Rohmaterialien erleichtert sein und sodann entfällt dabei auch die Nothwendigkeit, die Rüstung künstlich zu belasten um Deformationen des Lehrgerüsts vorzubeugen.“* [Büsing 1892, S. 256].

Weiter kann man aus dieser Beschreibung entnehmen und an zahlreichen anderen Brückenbauten verifizieren, dass die Anzahl der Abschnitte meist wesentlich höher war als beim Pont-aux-Doublets. Dies galt insbesondere für größere Bogen. Auf diese Weise konnte die Belastung des Lehrgerüsts noch gleichmäßiger erfolgen. Die Abbildung 6.24a zeigt die Ausführung des Hauptbogens der Illerbrücken in Kempten in 16 Teilen. Colberg beschrieb die Überlegungen zur Aufteilung der Abschnitte der Illerbrücken so, dass man bei dieser Lehrgerüstkonstruktion die größten Verdrückungen in der Mitte und an den auskragenden Enden des Gerüstträgers erwartet habe. Deshalb habe man zuerst den Scheitel belastet und dann, *„um die Aufwärtsbewegung der Kämpferstützen bei Durchbiegung der Trägermitte wieder wett zu machen, den Kämpfer.“* [Colberg 1906, S. 236]. Diese Überlegung fortführend habe man die folgenden Abschnitte jeweils

⁵¹² Gelegentlich werden in der Literatur auch die Begriffe „Abteilungen“, „Streifen“ oder „Lamellen“ verwendet [z. B. Emperger 1911, S. 343]. Die Verfasserin verwendet in vorliegender Arbeit vorwiegend den Begriff „Abschnitte“. Der Begriff „Streifen“ steht in dieser Arbeit für die Bogenteile bei dessen Längsaufteilung (vgl. z. B. Kap. 5.1.4 sowie 7.7).

⁵¹³ Beispielsweise beim Pont de Claix (Beschreibung im Katalog unter I5) oder bei der Wäldlitobelbrücke (vgl. im vorliegenden Kapitel weiter unten sowie Abbildung 6.26).

⁵¹⁴ In den Jahren 1891 und 1892 wurden von Dyckerhoff & Widmann insgesamt sechs Brücken über die Weißeritz gebaut [N. N. 1892]. Die letzten beiden erhaltenen Brücken mussten 2007 Neubauten weichen, da das Durchflussprofil als nicht mehr ausreichend bewertet wurde (vgl. auch Kap. 6.3.2, 6.3.4 und 8.3).

⁵¹⁵ Vgl. auch: *„So erhält das Lehrgerüst eine gleichmäßige Belastung, ohne daß eine solche vor dem Wölben künstlich aufzubringen ist.“* [Leibbrand 1906c, S. 457].

symmetrisch auf jeder Bogenseite an einem Arbeitstag erstellt. Das Verfahren habe sich als außerordentlich gut erwiesen, Risse seien nicht aufgetreten [Colberg 1906, S. 236]. Die Abschnittsfugen kann man bis heute am Bauwerk sehen (Abbildung 6.24b).

Bei der Anlage der Abschnitte mussten einige Punkte beachtet werden. Nach wie vor war das Hauptanliegen, die Verdrückungen im Lehrgerüst gering zu halten. Deshalb wurden die Abschnitte symmetrisch zu beiden Seiten des Scheitels angelegt.⁵¹⁶ Lediglich in Ausnahmefällen gab es ein Voraneilen einer Bogenseite, jedoch maximal um einen Abschnitt.⁵¹⁷ Die Abschnittsgröße wurde so dimensioniert, dass jeder Abschnitt an einem Tag fertiggestellt werden konnte.⁵¹⁸ Die Ausführung an einem Tag hatte baupraktische Gründe: Man wollte eine homogene Struktur innerhalb einer Lamelle erreichen. Die Stampfschichten sollten dabei rasch aufeinander folgen, um einen guten Verbund zwischen den Lagen zu bewirken [Büsing 1892, S. 256].

Die Reihenfolge der Abschnitte erfolgte nach der Überlegung, den einzelnen Teilen möglichst lange eine Bewegungsmöglichkeit zu erhalten (Abbildung 6.25). Theodor Gesteschi, der den betreffenden Teil des Handbuchs für Eisenbetonbau in der zweiten Auflage bearbeitet hat, beschrieb ebendort, dass im allgemeinen längere zusammenhängende Bogenstücke erst dann erhalten werden sollten, wenn sich die Verdrückungen im Lehrgerüstes weitestgehend ausgebildet haben. Die Schlussstücke seien deshalb auch möglichst schmal zu halten [Emperger 1911, S. 415]. Wo der Schluss des Gewölbes erfolgte, lag im Ermessen des verantwortlichen Ingenieurs. Nach Prüfung zahlreicher überlieferter Betonierpläne in der einschlägigen Literatur⁵¹⁹ konnte dahingehend kein einheitliches Schema festgestellt werden.

Ein weiterer Vorteil im Ablauf des Bauens in Abschnitten war die Tatsache, dass gleichzeitig an mehreren Stellen des Gewölbes gearbeitet werden konnte. Auf diese Weise konnten die Bauwerke wesentlich schneller erstellt werden als wenn man lediglich von den Kämpfern aus in Richtung Scheitel gearbeitet hätte. Abhängig war man dabei jedoch von der Mischkapazität des Betons auf der Baustelle.

Die baupraktische Durchführung hing im Wesentlichen vom Stichmaß des Bogens ab. Bei flachen Brücken lagen die Abschnitte fest auf, während man bei höherem Pfeilmaß

⁵¹⁶ Vgl. auch Abbildung 6.4.

⁵¹⁷ Vgl. Büsing: „Damit das Gerüst nicht deformiert werde muss an zwei symmetrisch zum Gewölbescheitel liegenden Stellen zugleich eingefüllt werden; oder auch es ist mit regelmässigem Wechsel der einen und anderen Seite zu arbeiten, damit die eine Seite der andern um nicht mehr als die Breite eines Streifens voraus eile.“ [Büsing 1892, S. 256]. Bekannt ist die vorausseilende Betonierung vom Bau der Munderkinger Donaubrücke: „Es wurde abwechslungsweise je auf der einen und der anderen Seite des Bogens vom Kämpfer her gegen die Mitte betoniert.“ [Leibbrand 1894, S. 553]. Weiteres Beispiel: Leinebrücke Grasdorf [Bock, Dolezalek 1901, S. 333].

⁵¹⁸ Emperger beschreibt beide Aspekte – Symmetrie und Größe der Abschnitte – in folgendem Zitat: „Die Breite der Streifen wurde nach der Tagesleistung so bestimmt, daß an einem Tage gleichzeitig auf jeder Bogenseite je eine Lamelle vollständig fertiggestellt werden konnte.“ [Emperger 1908a, S. 13].

⁵¹⁹ Beispielsweise: Mitte Schenkel: Kempten [Büsing 1912, S. 619], Sauvage [Emperger 1911, S. 415]. Kämpfer: Lautrach [Séjourné 1913d, S. 163], Wallstraßenbrücke Ulm [Emperger 1911, S. 416]. Scheitel und Kämpfer gleichzeitig: Donaubrücken in Ehingen/Berg [Braun 1901] und Munderkingen [Reihling 1896]. Am Scheitel: Augustusbrücke Dresden [Preßprich 1910, S. 366]. An mehreren Stellen: Walnut Lane Bridge in Philadelphia [Fr. E. 1910, S. 51].

besondere Maßnahmen zum Absprießen anbringen musste. Ein besonders eindrückliches Beispiel bietet hier die Wäldlitobelbrücke mit einer Lichtweite von 41 m (Abbildung 6.26). Der Bogen wurde in Abschnitten erstellt. Die provisorischen Widerlager in den Bogenschenkeln wurden durch seitlich am Bogen vorbeigehende Abpöhlungen bis zum anstehenden Fels ausgeführt. Die Konstruktion erreichte dabei auf der im Bild rechten Seite eine Länge von über 20 m [Kinzer 1884, S. 250]. Diese Ausführung ist jedoch als Einzelfall zu werten, auch in der historischen Literatur ist die Meinung zu dieser Maßnahme klar: „Die (...) für notwendig gehaltenen künstlichen Absteifungen gegen die Felswände (...) sind unnötig gewesen. Es hätte genügt, die künstlichen Widerlager unmittelbar mit dem Lehrgerüst zu verbinden (...)“ [Landsberg 1899, S. 305].⁵²⁰

Der Standardfall war die Absprießung auf dem Lehrgerüst. Dazu werde „eine in sich ausreichend starke, oder gut abgesteifte Bohle oder eiserne Schablone benutzt, welche auf der Schalung in geeigneter Weise durch Spreitzen oder Keile fest zu setzen ist.“ [Büsing 1892, S. 256]. Die Abbildung 6.27 zeigt die Baustelle der Walnut Lane Bridge in Philadelphia mit einer solchen Einrichtung zum Absprießen eines Abschnittes gegen das Lehrgerüst.⁵²¹ Wichtig bei der Herstellung der Absteifungen war die radiale Ausbildung: „Die Trennungsflächen zwischen zwei Streifen müssen radial gerichtet sein.“ [Büsing 1892, S. 256].⁵²² Der Grund dafür ist, dass die im Bogen entlang geleiteten Kräfte senkrecht auf die Trennung im Material treffen sollten, um in der Fuge keine Scherkräfte hervorzurufen. Um einen möglichst guten Verband innerhalb dieser Abschnittsfugen zu erhalten, wurde der bestehende Teil jeweils mit einer Zementschlämme überzogen, bevor der nächste Abschnitt angearbeitet wurde.⁵²³

Die bisher beschriebenen Maßnahmen wurden insbesondere bei großen Brückenprojekten miteinander kombiniert. Sehr eindrücklich wird dies am Beispiel der 90 m weiten Friedensbrücke in Plauen, 1903–1904.⁵²⁴ Stadtbaurat Fleck berichtete, dass das Lehrgerüst mit dem gesamten für den Bau erforderlichen Steinmaterial zuzüglich eines Zuschlages für das Mörtelgewicht vorbelastet worden sei [Fleck 1904, S. 355]. Hierin zeigt sich ein besonderer Vorteil der Bruchstein-Zementmörtel-Bauweise: Während das

⁵²⁰ Ähnliche Bewertung dieser Ausführung im Handbuch der Baukunde: „eine Maassregel, deren Nothwendigkeit im allgemeinen bezweifelt werden darf.“ [Barkhausen 1892, S. 329]. Nach Melans Einschätzung sind dieselben „kaum als nothwendig zu bezeichnen“ [Melan 1911, S. 191].

⁵²¹ Bei der Walnut Lane Bridge wurde eine weitere Einrichtung zur Sicherung der Abschnitte verwendet. In die mittleren zehn Abschnitte wurden drei Eisenanker mit einem Durchmesser von 30 mm einbetoniert, die die Blöcke gegeneinander verankerten [Emperger 1911, S. 418; Abb. auf S. 417].

⁵²² Weiteres Beispiel Donaubrücke Inzigkofen: „Die einzelnen Absätze durch die ganze Gewölbbebreite reichend wurden durch Bretttafeln mittelst besonderer Böcke normal zur Gewölbeleibung abgesteift.“ [Leibbrand 1895/96, S. 75].

⁵²³ Vgl. beispielsweise vom Bau der Leinebrücke Grasdorf: „Vor dem Ansetzen frischen Betons sind die rauhen Flächen der Tags zuvor hergestellten Theile abgospült und mit dünnflüssigem Cementmörtel beworfen worden, welcher mit Reisigbesen fest aufgerieben wurde.“ [Bock, Dolezalek 1901, S. 326].

⁵²⁴ Weiteres Beispiel ist die Addabrücke Morbegno: Nach einer sehr ausführlichen Beschreibung im Centralblatt der Bauverwaltung 1903 wurde der Bogen zwar in Ringen ausgeführt. Um die weiter oben beschriebenen Nachteile jedoch zu beheben, wurden diese wiederum in Abschnitte aufgeteilt. Über den Stützpunkten des Lehrgerüsts seien die Fugen zunächst offen gelassen worden. „Auf diese Weise besteht das ganze Gewölbe zunächst aus vielen kleinen, zusammenhanglosen Theilen, denen ein Nachgeben des Lehrgerüsts nicht schaden kann, und welche entsprechend dem Fortschreiten der Arbeit sich zu immer größeren Theilen vereinigen, bis endlich (...) zum Schluß der eingespannte Bogen entsteht.“ [Wolff 1903, S. 480].

Vorbelasten des Lehrgerüsts beim Stampfbeton unpraktisch war, konnte man bei dieser Bauweise den aufgebrauchten Ballast direkt verarbeiten. Des Weiteren wurde der Bogen in Abschnitten gebaut (Abbildung 6.28), wobei zwischen den Teilen abgetreppte Lücken gelassen wurden, die erst ganz am Ende in der angegebenen Reihenfolge verfüllt wurden. Diese Vorgehensweise lasse dem Bogen *„bis zuletzt eine vollkommen genügende Bewegungsfreiheit“* [Fleck 1904, S. 355].

Eine oder mehrere dieser Methoden wurden bei jedem größeren Brückenbau verwendet. Die Wirkung beschrieb Max Leibbrand: *„Alle diese Ausführungsarten gewährleisteten in hohem Maße die unschädliche Anpassung des Gewölbes an die Bewegungen des Lehrgerüsts und führen die gefürchteten Rißbildungen auf ein sehr kleines Maß zurück.“* [Leibbrand 1906c, S. 457]. Jedoch waren diese Methoden weitestgehend dazu bestimmt, mit den Bewegungen im Zuge des Bauablaufes umzugehen.

7 DIE VERWENDUNG VON GELENKEN IN MASSIVBRÜCKEN⁵²⁵

Einen Schritt weiter gingen die Ingenieure in der Ausbildung von konstruktiv ausgebildeten Gelenken. Damit wurde die Stützlinie gezwungen, durch festgelegte Punkte des Bogenquerschnittes zu gehen. Hierbei ist es von entscheidender Bedeutung, ob temporäre oder permanente Gelenke gebaut wurden. Während das temporäre Gelenk⁵²⁶ nach Fertigstellung der Brücke vergossen wird und deshalb auch lediglich gegen die schädlichen Einflüsse während des Bauprozesses gedacht ist, ist ein permanentes Gelenk⁵²⁷ dauerhaft aktiv und kann deshalb auch Bewegungen aus Temperaturverformungen, Widerlageretzungen und dynamischen Lasten aufnehmen.

In neuerer Zeit haben sich diesem Thema der frühen Gelenkausbildungen in Massivbrücken die folgenden Publikationen näher gewidmet: Klaus Stiglat [Stiglat 1999a, 140–142], Ulrich Boeyng [Boeyng 2006a; Boeyng 2006b; Boeyng 2006c] sowie Steffen Marx und Gregor Schacht [z. B. Marx, Schacht 2010b; Marx, Schacht 2010a; Schacht, Marx 2010]. Auch Volker Wetzki behandelte in seiner Dissertation zu den Lagern eiserner Brücken in einer Nebenbetrachtung das Thema der Gelenke in Massivbrücken [Wetzki 2010, S. 36–43]. Das vorliegende Kapitel vertieft darüber hinausgehend anhand bisher nicht berücksichtigter historischer Literatur sowie eigener Archivrecherchen und Untersuchungen an noch vorhandenen Brücken diese Entwicklung von der ersten Idee bis hin zur Ausführung der verschiedenen Arten von Gelenken.

7.1 Von der Idee und der wissenschaftlichen Betrachtung von definierten Drehpunkten in Gewölben: Jules Dupuit und Friedrich Heinzerling

*„Seit langem sind sich die Ingenieure im Klaren darüber, dass sich durch die Bewegungen der Gewölbe beim Ausrüsten der Druck in einigen Fugen in Richtung der Kanten des Intrados verschiebt.“*⁵²⁸ [Dupuit 1870, S. 195]. Betrachtungen zur Stützlinie waren nicht neu, auch andere hatten die Schadensmechanismen insbesondere beim Ausrüsten ausführlich betrachtet und beschrieben.⁵²⁹ Jules Dupuit, der bereits 1866 verstorben war, ging jedoch

⁵²⁵ Der Inhalt dieses Kapitels wurde in stark verkürzter Form vorveröffentlicht in [Veihelmann, Holzer 2015]; [Veihelmann, Holzer (Veröffentlichung voraussichtlich 2016)].

⁵²⁶ Temporäre Gelenke werden in der Literatur auch als provisorisch, vermörtelt, geschlossen, vorübergehend, unvollkommen usw. bezeichnet. Die Verfasserin nutzt in dieser Dissertation vorwiegend den Begriff temporär.

⁵²⁷ Permanente Gelenke werden in der Literatur auch als offen, definitiv, dauerhaft, vollkommen usw. bezeichnet. Die Verfasserin nutzt in dieser Dissertation vorwiegend den Begriff permanent.

⁵²⁸ „Depuis longtemps les constructeurs s'étaient aperçus, par suite du mouvement des voûtes au décentrement, la pression se portait près de l'arête à l'intrados dans certains joints et voici comment ils remédiaient aux inconvénients que pouvait avoir ce mouvement.“

⁵²⁹ Vgl. etwa die umfassenden Versuche zur Rissbildung von Boistard [Boistard 1810] oder auch das folgende Zitat von Gauthey: „Es folgt aus den verschiedenen Bewegungen, (...) dass sich der Druck in der Nähe der Bruchfugen in Richtung der oberen oder unteren Kanten verschiebt, und dass die Steine dort anfälliger sind bezüglich Abplatzen und Brechen als an jeder anderen Stelle. Man kann diesem Nachteil teilweise begegnen, indem man die Keile weit von den Kanten legt sowie eine Art Abschrägung der Steinkanten ausbildet, damit sich diese nicht berühren können.“ Original: „Il résulte des différents mouvements qui se manifestent dans les voûtes, et des tassements qu'elles éprouvent, soit pendant la pose des voussoirs, soit après le décentrement, que la poussée se reporte auprès des points de rupture sur les arêtes supérieures ou inférieures des voussoirs, et que les pierres y sont plus sujettes à s'éclater et à s'épaufrer que dans tout autre endroit. On prévient en

in seiner 1870 posthum erschienenen Monographie „*Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie*“ [Dupuit 1870] einen entscheidenden Schritt weiter.

In diesem Werk beschrieb Dupuit alle relevanten Themen des Massivbrückenbaus, unter anderem beschäftigte er sich ausführlich mit den gängigen Gewölbetheorien und den bautechnischen Problemen der Rissbildung in den Bruchfugen. Er schrieb auch über die Schadensbilder, die insbesondere während des Ausrüstens auftraten: Entscheidend bei der Betrachtung sei der Drehpunkt an der Innenseite des Bogens. Er schrieb hierzu: „*Das generelle Prinzip, das bei den Betrachtungen der Stützlinie im Bogen leitend sein muss, ist, dass es am Intrados immer einen Punkt geben muss, um den sich der Bogen während des Ausrüstens dreht. (...) Man kann diesen Punkt einfach bestimmen (...), wenn man bedenkt, dass sich die beiden Halbbögen senken, wenn sie sich selbst überlassen werden und man dann die Drehachse dieser Senkung bestimmt. (...) Für die überwiegende Mehrheit der Bogen findet man diesen Punkt – entweder absolut oder mit einer für die Praxis ausreichenden Näherung.*“⁵³⁰ [Dupuit 1870, S. 101].

Dupuit ging bei der Lösung des Problems noch weiter als etwa Gauthey und Navier. Überlegungen, wie man diese Fugen durch Steine höherer Festigkeit beständiger machen könne, hielt Dupuit lediglich für eine Notlösung. Nicht die Vermeidung der Bewegung, sondern deren Kontrolle war das Ziel Dupuits: Mit ihm schlug erstmals ein Ingenieur vor, die Stützlinie durch einen Punkt in der Fugenmitte zu zwingen, „*und zwar durch eine Anordnung, die auf der Innenseite des Bogens die Fugenlinie durch eine etwas geneigte Linie ersetzen würde, verbunden mit einer Krümmung, über die sich das Gewölbe beim Ausrüsten abrollen könnte, wenn dieser Teil der Fuge lediglich mit Werg gefüllt wäre.*“⁵³¹ [Dupuit 1870, S. 195; Abbildung 7.1]. Auf diese Weise werde dem Bogen eine Möglichkeit zur Bewegung

partie cet inconvénient en axant soin de poser les cales loin des arêtes, et sur-tout en formant autour des lits une sorte de biseau, pour que les arêtes des pierres ne puissent se toucher.“ [Gauthey, Navier 1813, S. 322–323].

⁵³⁰ Original (im Zusammenhang): „Le principe général qui doit guider dans la recherche de la courbe de pression d'une voûte, c'est qu'il y a toujours à l'intrados un point autour duquel cette voûte tournera au décentrement pour s'appuyer sur la clef où se produit une réaction dite poussée. L'énergie de cette réaction, qui va croissant, s'arrête nécessairement au moment où se produit l'équilibre. On détermine facilement ce point qui devrait s'appeler point de rotation et pas point de rupture, en imaginant que la demi-voûte est abandonnée à elle-même et va tomber, et en déterminant l'axe de rotation de cette chute. Ce n'est que pour les cas exceptionnels que cette recherche est nécessaire; pour l'immense majorité des voûtes, ce point se trouve déterminé, soit d'une manière absolue, soit avec une approximation suffisante dans la pratique.“

⁵³¹ Original (im Zusammenhang): „Ce que nous venons de dire n'est qu'un palliatif de l'inconvénient de la position de la pression près de l'intrados, mais il nous semble qu'on peut faire mieux encore et ramener la pression au centre du joint par une disposition (fig. 88) [Abbildung 7.1, Anm. d. Verf.], qui consisterait à remplacer, du côté de l'intrados, le prolongement du joint par une ligne faisant avec celui-ci un angle très obtus raccordé par une courbe sur laquelle roulerait la voûte au décentrement, si cette partie du joint n'était garnie que d'étope. On déterminerait ainsi un point de passage obligé de la courbe de pression et qui la placerait comme on voudrait par rapport à l'intrados; on pourrait faire quelque chose d'analogue à la clef. Il n'y aurait plus alors rien d'indéterminé dans le tracé de la courbe de pression, ce qui permettrait de la faire passer par le milieu de tous les joints en faisant varier convenablement le poids de la voûte, ainsi que nous l'avons expliqué dans le chapitre III. Il est inutile que cette articulation se trouve précisément au joint de rupture, théoriquement elle aurait partout le même effet; mais de même qu'une ligne droite est d'autant mieux déterminée par deux points qu'ils sont plus écartés entre eux, de même il conviendrait ici d'éloigner ce point de passage de la clef et nous croirions convenable de placer l'articulation dans un point accessible après le décentrement pour qu'on pût mieux observer ce qui s'y passe et garnir le joint aussi facilement à l'extrados qu'à l'intrados.“

gegeben und die Stützlinie durch einen zuvor bestimmten Durchgangspunkt – in gewisser Entfernung vom Intrados – geführt. Eine entsprechende Vorrichtung könne man auch im Scheitel einführen, somit beschrieb Dupuit erstmals einen Dreigelenkbogen im Massivbau. Durch die Einführung dieser Gelenke gebe es dann auch keine Unbestimmtheiten mehr im Verlauf der Stützlinie. Zur Positionierung der Gelenke sagte Dupuit, dass sie nicht exakt in den Bruchfugen liegen müssen, theoretisch hätten sie überall denselben Effekt; es sei jedoch besser, diese möglichst weit vom Scheitel wegzurücken und die Lage so zu wählen, dass man das Gelenk auch nach dem Ausrüsten noch gut beobachten und mit Mörtel füllen könne, und zwar vom Extrados wie auch vom Intrados [Dupuit 1870, S. 195].⁵³¹

Zur Verstärkung des Gelenkbereichs könne man zwischen zwei Keilsteinen Gusseisenplatten einlegen. Zwischen diesen solle eine Bleiplatte von 3 bis 4 mm Stärke die Metallplatten vor dem konzentrierten Druck schützen. Nach dem Ausrüsten des Bogens schlug er eine Verfüllung dieser Fugen mit Mörtel vor, „*diese gefüllte Fuge würde sich in nichts von den anderen Fugen des Bogens unterscheiden.*“⁵³² [Dupuit 1870, S. 197]. Das heißt, dass Dupuits Gelenk als temporäres Gelenk für den Bauprozess gedacht war.

Reaktionen auf Dupuits Abhandlung gab es in den Folgejahren vor allem von seinem Landsmann Alphonse Debaue und in Italien von Celeste Clericetti [Clericetti 1873, in der deutschen Fassung: Clericetti 1874, des Weiteren Clericetti 1876]. Clericetti versuchte, durch praktische Untersuchungen an Brückengewölben vor allem während des Ausrüstungsvorgangs die Thesen von Dupuit zu verifizieren. Ausgenommen kleinerer Modifikationen bezüglich der Druckfläche in der Bruchfuge beinhalteten die Aufsätze von Clericetti aber keine bedeutende Neuerung der Gelenktheorie.

Alphonse Debaue schlug im Jahr 1873 in seinem „*Manuel de l'ingénieur des ponts et chaussées*“ erstmals die Verwendung von Zapfengelenken im Massivbau vor: „*Man könnte diese zwei Fugen [Bruchfugen, Anm. d. Verf.] frei von Mörtel lassen und in ihrer Mitte, üblicherweise an den Stirnen, beispielsweise einen Gusseisenzylinder platzieren, der umfasst wird von zwei hohlen Halbzylindern, ebenso aus Gusseisen, die in die beiden Teile des anliegenden Gewölbes eingebettet werden.*“⁵³³ [Debaue 1873, S. 95] Während des Ausrüstens vollzöge sich die Drehung des Bogens gezwungenermaßen um diese Achse und damit ginge auch der Schub durch diesen Punkt. Schließlich, nach dem Ausrüsten, seien diese Fugen mit einem beliebigen Mörtel zu verschließen: Auch Debaue ging somit von einem temporären Gelenk aus, auch er empfahl die Verfüllung mit Mörtel.

⁵³² Original (im Zusammenhang): „Ces pierres résistent parfaitement aux pressions considérables qui leur sont transmises, parce que ces pressions ont lieu seulement sur la partie centrale de leur surface. On pourrait d'ailleurs augmenter cette résistance en intercalant au point de contact des plaques de fonte encastées dans les deux voussoirs, de manière que la surface métallique remplacerait celle de la pierre. Enfin, une feuille de plomb de 3 ou 4 millimètres d'épaisseur interposée entre les deux surfaces métalliques pourrait préserver le métal lui-même contre l'effet de la concentration de la pression sur un point isolé; une fois la voûte décintrée, le joint garni de mortier ne différerait en rien des autres joints de la voûte.“

⁵³³ Original: „pour cela, on laisserait ces deux joints vides de mortier, et on placerait en leur milieu, normalement aux têtes, par exemple un cylindre en fonte, embrassé par deux demi-cylindres creux, également coulés en fonte, et enchâssés dans les deux parties de voûte adjacentes.“

Den nächsten entscheidenden Entwicklungsschritt ging Friedrich Heinzerling: Er war der erste Deutsche, der in seinem 1872 in der Zeitschrift für Bauwesen abgedruckten Artikel „*Analytisch-graphische Construction der Brückengewölbe*“ die Fixierung der Endpunkte der Stützlinie im Scheitel und in den Kämpfern in Massivbrücken durch die Anwendung von Druckschlägen⁵³⁴ vorschlug [Heinzerling 1872a, S. 426; Abbildung 7.2].⁵³⁵

Dabei ist es kaum verwunderlich, dass ein solcher Vorschlag von einem ausgewiesenen Eisenbauexperten gemacht wurde. Dort begann die Diskussion um den Einsatz von Gelenken nämlich viel früher.⁵³⁶ Auch Heinzerling verfolgte diese Entwicklung, was in seinen Publikationen zum Eisenbau klar erkennbar ist.⁵³⁷ Zur Kontrolle der Stützlinie äußerte sich Heinzerling diesbezüglich wie folgt: „*Die Unbestimmtheit der Lage der Druckkurve in den bogenförmigen Rahmen der Bow-Strings veranlaßte den belgischen Ingenieur Dallot, die Tragbogen der (...) 1861 vollendeten schiefen Brücke über die Schelde bei Oudenarde (...) aus je zwei, im Scheitel nur gegen niedrige Keile gestemmt, Stücken bestehen zu lassen und hierdurch eine Verlegung und Fixirung der Drucklinie in die halbe Scheitelhöhe, selbst bei einseitigen Belastungen, zu bewirken (...)*.“ [Heinzerling 1870, S. 248–249]. Auch wenn der Grundgedanke einer dauerhaft gelenkigen Lagerung damit nicht neu war, die Übernahme in den Massivbrückenbau ist ein Verdienst Heinzerlings.

War der Beweggrund bei Dupuit noch der bautechnische, Schäden durch Bewegungen während des Ausrüstens zu minimieren, so ging Heinzerling hier einen bedeutenden Schritt weiter: Die Druckschläge sollten nicht nur für die Bewegungen des Bogens während des Ausrüstens, sondern auch „*bei den geringen, in Folge von Temperaturveränderungen und einseitigen Belastungen eintretenden Hebungen und Senkungen desselben Charnieren ähnlich wirken*.“ [Heinzerling 1872a, S. 426]. Eine nachträgliche Verfüllung des Gelenks mit Mörtel und damit ein Außerkraftsetzen der Drehmöglichkeit nach Fertigstellung des Gewölbes wurden von Heinzerling nicht vorgesehen. Er schlug somit erstmals ein permanentes Gelenk im Massivbau vor. Damit ist Heinzerlings Gelenk im Gegensatz zu Dupuits Vorschlag nicht nur eine bautechnische Lösung für das Rissproblem. Vielmehr schlug er eine Möglichkeit vor, die Stützlinie dauerhaft zu kontrollieren und beschrieb damit den Weg, den Bogen berechenbar zu machen. Ähnlich wie bei der Verwendung von eisernen Gelenken sollten die höher belasteten Bauteile des Gelenkes – also die An- und Auslaufsteine im Scheitel und im

⁵³⁴ Beschreibung der Druckschläge aus dem Handbuch der Baukunde: „Indem man Hausteine von großer Härte an diesen Stellen einlegt und durch schwach zylindrische Bearbeitung der Lagerfugen den Druck zwingt, sich nahezu auf eine Linie zu vereinigen, ermöglicht man den Gewölbeschenkeln die Ausführung kleiner durch das Setzen der Lehrgerüste und das Ausrüsten hervor gerufener Bewegungen, ohne dass Risse im Mauerwerk entstehen.“ [Barkhausen 1892, S. 327].

⁵³⁵ Der Artikel ist unterschrieben mit „*Aachen, im September 1871 Dr. Heinzerling*“. Heinzerling hat deshalb in späteren Jahren auf seinen Artikel von 1871 verwiesen [z. B. Heinzerling 1875, S. 4; Heinzerling 1891, S. 4], die Verfasserin verwendet jedoch das Publikationsjahr als Referenz.

⁵³⁶ Vertiefte Betrachtungen zur historischen Entwicklung der Verwendung von Gelenken im Eisenbau z. B. in [Schäffer, Sonne 1882], sowie modern beispielsweise in [Lorenz 1990] und [Wetzck 2010].

⁵³⁷ So beschrieb er Gelenke in eisernen Konstruktionen beispielsweise in seinem Artikel in der Allgemeinen Bauzeitung von 1868 [Heinzerling 1868, S. 82–84] und insbesondere in seinem Buch „*Brücken in Eisen*“ [Heinzerling 1870, S. 248–249; S. 331–333; S. 343–354].

Kämpfer sowie der Schlussstein – aus festerem und dauerhafterem Material ausgebildet werden als das übrige Gewölbe [Heinzerling 1872b, S. 276].

Es folgten weitere Abhandlungen, ohne dass jedoch jemand wirklich ein Gelenk in einer Massivbrücke ausführte. In Frankreich ist es Gustave Brosselin, der im Vorfeld zum Bau der Brücke von Tolbiac in Paris ausführliche Überlegungen und Versuche durchführt [Brosselin 1878]. Für den Hauptbogen der Brücke schlägt er vor, *„am Scheitel und an den Bruchfugen zwei Reihen von Werksteinen höherer Festigkeit einzubauen und diese Differenz des Widerstandes dafür zu nutzen, die Fuge zwischen diesen beiden Reihen zu reduzieren, um die Stütze von den Kanten wegzuschieben und damit den maximalen Druck, den das übrige Gewölbe zu ertragen hat, zu verringern.“*⁵³⁸ [Brosselin 1878, S. 1–2]. Zwischen den Werksteinen dieser reduzierten Fuge fügte er eine Mörtelrinne ein, um die gleichmäßige Kräfteverteilung zu gewährleisten (Abbildung 7.3). Mit dieser Vorrichtung könne man die Dicke des Bogens verringern, was verschiedene Vorteile einbrachte: Kostensenkungen durch die Verkleinerung der Pfeiler, der Widerlager und der Lehrgerüste und darüber hinaus technische Verbesserungen, die den Bau von wesentlich größeren und kühneren Gewölben zuließen [Brosselin 1878, S. 1–2].

Man kann nicht mit absoluter Sicherheit sagen, ob Brosselin diesen Vorschlag auch ausgeführt hat. Brosselin selbst schrieb in seiner Abhandlung, dass er dieses Gelenk am Hauptbogen der Brücke von Tolbiac ausgeführt habe, allerdings schrieb er diese Abhandlung vor dem Baubeginn (1879–1880) und es gibt mindestens vier historische Publikationen, die Brosselins Ideen zwar besprechen, jedoch die Ausführung des Vorschlages bestreiten [La Rivière 1891, S. 929;⁵³⁹ Bourdelles 1898, S. 33;⁵⁴⁰ Tavernier 1899, S. 80;⁵⁴¹ Séjourné 1913d, S. 27⁵⁴²]. Die Verfasserin bezweifelt daher die Ausführung.

Ein weiterer wichtiger Name in diesem Zusammenhang ist Emil Winkler.⁵⁴³ In seinen als Manuskript gedruckten Vorträgen über die Statik der Baukonstruktionen erwähnt er

⁵³⁸ Original: „à la clef et au joint de rupture deux rangs de voussoirs en pierre de taille d’une résistance supérieure à celle des maçonneries qui forment le reste de la voûte et à utiliser cette différence de résistance en réduisant la hauteur du joint compris entre les deux voussoirs de manière à éloigner la courbe des pressions des arêtes et à diminuer par suite les pressions maxima que les autres parties de la voûte ont à supporter.“

⁵³⁹ Er beschreibt hier ausführlich den Bericht von Brosselin und formuliert: „aux-quelles il n’a manqué que la mise en pratique“, also denen lediglich die praktische Umsetzung fehlte.

⁵⁴⁰ Auch Bourdelles schreibt über Brosselins Untersuchungen, er formuliert: „Cette ingénieuse idée n’a pas reçu d’application en France, mais elle a été accueillie avec une grande faveur en Allemagne.“, also: „Diese geistreiche Idee hat in Frankreich keine Anwendung erfahren, aber sie wurde mit großem Erfolg in Deutschland eingesetzt.“

⁵⁴¹ Auch Tavernier schreibt über Brosselin: „L’ingénieuse disposition de M. Brosselin n’ayant pas eu d’application, c’est M. Leibbrand de Stuttgart qui a construit pour la première fois des ponts en maçonnerie à articulations.“, also: „Diese geistreiche Anordnung von Brosselin hat keine Anwendung erfahren. Es war Leibbrand aus Stuttgart, der als erster Gelenke in Massivbrücken eingebaut hat.“

⁵⁴² Zu den reduzierten Fugen von Brosselin sagt Séjourné: „Ces indications n’ont pas été suivies: les voûtes du pont de Tolbiac sont inarticulées.“, also: „Diesen Angaben wurde keine Folge geleistet: Die Gewölbe der Tolbiacbrücke sind eingespannt.“

⁵⁴³ Winkler wird von Melan mehrfach als „Erfinder“ der Gelenke im Massivbau genannt: „Schon vor 30 Jahren schlug Professor Winkler die Ausführung solcher Gelenke für Steingewölbe vor, doch wurde damals diese Idee,

1878, dass die beschriebene „durch die Mitte der Scheitel- und Kämpferfuge konstruierte Stützlinie nur dann die wirkliche Stützlinie ist, wenn man sie genau mit der Mittellinie zusammenfallen lässt, oder wenn man am Scheitel und an den Kämpfern gelenkartige Anordnungen macht, welche die Stützlinie zwingen, durch die Axen derselben zu gehen.“ [Winkler 1878, T. 3, S. 22]. In seinem mehrteiligen Artikel „Lage der Stützlinie im Gewölbe“ von 1879/80 fasst er nochmals ausführlich die verschiedenen Möglichkeiten, die Stützlinie in eine „möglichst günstige Lage“ [Winkler 1879; 1880, S. 59] zu bringen, zusammen: Hierbei bezeichnet er den Einsatz von Gelenken als das „radikalste Mittel“ [Winkler 1879; 1880, S. 59]. Er beschreibt die verschiedenen bis dahin vorgeschlagenen Gelenkausbildungen und erkennt auch schon das Problem des Gleitens im Gelenk: Winkler schlug hier bereits die Verwendung von eisernen Dübeln gegen das Verrutschen des Bogens im Gelenk vor [Winkler 1879; 1880, S. 59].⁵⁴⁴ Dieser Vorschlag wurde in neuerer Zeit Jules Dupuit zugeschrieben [Stiglat 1999a, S. 141], in seiner Publikation ist davon jedoch nichts zu finden.⁵⁴⁵ Zum Zeitpunkt dieses Artikels sei der Einsatz von Gelenken zwar mehrfach vorgeschlagen, jedoch „bisher noch nicht angewendet worden.“ [Winkler 1879; 1880, S. 59]. Winkler führte dies – insbesondere für die Verwendung von eisernen Gelenken – darauf zurück, dass bei den meisten Ingenieuren „diese augenscheinlich Bewegungen zulassende Stützung durch schmale Flächen gegenüber dem massigen Steinbogen gegen das praktische Gefühl ist.“ [Winkler 1879; 1880, S. 59]. Winkler war jedoch der Idee durchaus zugetan. So resümierte er, ernstliche Bedenken gegen diese Konstruktion können wohl nicht ins Feld geführt werden [Winkler 1879; 1880, S. 59]. In dieser Abhandlung wird auch klar, dass Winkler bereits explizit zwischen temporären und permanenten Gelenken unterscheidet: Er spricht von offenen Fugen und im Folgenden vom Einfluss der Temperatur, später schreibt er noch in einem eigenen Absatz über provisorische, nach dem Ausrüsten zu vergießende Gelenke: „In diesem Falle wird sich das Gewölbe hinsichtlich des Eigengewichts wie ein Bogen mit Gelenken, hinsichtlich der zufälligen Last dagegen wie ein Bogen ohne Gelenke verhalten.“ [Winkler 1879; 1880, S. 60].

Ein weiterer Vorschlag zum Einbau von Gelenken aus den Folgejahren ist der Deutschen Bauzeitung zu entnehmen: Hier nimmt ein ungenannter Autor [Schmölcke 1879, S. 528] Bezug auf die Gewölbeversuche von Feege & Gotthardt.⁵⁴⁶ Dabei war ein Bogen, der zum

in welcher wir jetzt einen bezeichnenden Fortschritt im Steinbrückenbau erblicken müssen, als unpraktisch erklärt.“ [Melan 1903–1904, S. 186] sowie „Die Anwendung von Gelenken im Steinbrückenbau wurde bereits vor etwa 40 Jahren von E. Winkler in Vorschlag gebracht, doch fand dieser Vorschlag damals wenig Beachtung und Zustimmung.“ [Melan 1911, S. 202]. Die im relevanten Zeitraum von Winkler erschienenen Publikationen wurden von der Verfasserin geprüft, Grundlage bildete hierbei die von Knothe erstellte Bibliographie [Knothe 2004]. Es konnte kein entsprechender Vorschlag zu dieser frühen Zeit ausgemacht werden, die erste der Verfasserin bekannte Äußerung von Winkler zu den Gelenken in Massivbrücken ist diejenige aus dem im Fließtext beschriebenen Manuskript.

⁵⁴⁴ Vgl. Kap. 7.5.6.

⁵⁴⁵ Verfasserin geht davon aus, dass dem Autor nicht die Originalquelle von Dupuit vorlag, sondern Leibbrands „Gewölbte Brücken“ [Leibbrand 1897b, S. 42] bzw. der vierte Band von Paul Séjournés „Grandes Voûtes“ zu den gelenkigen Brücken, wo Leibbrand wörtlich zitiert wird [Séjourné 1913d, S. 27]. Diese Textstelle ist missverständlich: Dupuits Vorschlag wird zwar erwähnt und kurz beschrieben. Danach werden verschiedene, spätere Vorschläge wie etwa auch die eisernen Dübel, provisorische oder permanente eiserne Gelenke usw. genannt. Aus vorliegender Arbeit geht hervor, dass hier die vollumfängliche Urheberschaft Dupuits mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann.

⁵⁴⁶ Vgl. Kap. 4.4.

Kämpfer hin dicker wurde, weniger belastbar als ein Bogen mit zum Kämpfer hin abnehmender Stärke. Dies begründet er damit, dass der Bogen mit abnehmender Stärke als Zweigelenkbogen betrachtet werden könne, der den durch die aufgebrachte Belastung entstehenden Bewegungen besser folgen könne. Da aber nach der Gewölbetheorie eine Verstärkung des Bogens im Kämpferbereich durchaus gerechtfertigt sei, solle man den Vorteil des Zweigelenkbogens dadurch nutzen, dass man Gebrauch mache von einer *„schwach gekrümmten offenen Kämpferfuge unter gleichzeitiger Verwendung druckfesteren Materials für die anliegenden Theile“* [Schmölcke 1879, S. 528, Abbildung 7.4]. Der Vorschlag ähnelt sehr demjenigen von Heinzerling, allerdings hatte auch dieser Autor noch keine praktischen Erfahrungen in der Anwendung von Gelenken: *„Ueber das Verhalten einer derartigen Steinkonstruktion bei veränderlicher Belastung müsste aber zunächst die Erfahrung Aufschluss geben.“* [Schmölcke 1879, S. 528].

Eine ganz interessante Bemerkung macht Emil Dietrich in seinem mehrteiligen Artikel *„Ein Wort zu Gunsten der Steinbrücken“* von 1882 [Dietrich 1882]. Hierin beschreibt er den Einsatz von Gelenken anhand der Kettenlinie. Im umgekehrten Bogen seien jedoch nur noch drei Gelenke zulässig, Sie seien unter anderem deshalb erwünscht, da sie eine statische Untersuchung erleichtern [Dietrich 1882, S. 109]. Später weist er auf einen studentischen Entwurf von *„stud. Mellin“*⁵⁴⁷ hin (Abbildung 7.5), der in einer steinernen Brücke jeweils Gelenke im Scheitel und in den Kämpfern zeichnete [Dietrich 1882, S. 161]. Wahrscheinlich ist dieser Entwurf jedoch auch nicht ausgeführt worden.

Wie ausführlich dargestellt, gab es verschiedentliche Vorschläge und gedankliche Auseinandersetzungen mit den definierten Drehpunkten im Gewölbe. Der praktische Einsatz derselben erfolgte jedoch erst eine Dekade nach der ersten Erwähnung von Jules Dupuit durch Claus Köpcke im Jahre 1880, wie im Folgenden beschrieben wird.

7.2 Von der ersten Ausführung von Gelenken in Deutschland: Claus Köpcke und Karl von Leibbrand

Claus Köpcke, der bereits seit 1869 als Professor in Dresden tätig war, trat 1872 in den Dienst des Königlich Sächsischen Finanzministeriums, das für den Bau des sächsischen Schmalpurnetzes verantwortlich war [N. N. 2007]. In dieser Funktion machte er wiederholt schlechte Erfahrungen beim Bau von Mauerwerks-Eisenbahnbrücken in der Hinsicht, dass sich beim Ausrüsten klaffende Fugen bildeten und Kanten der Werksteine abbrachen [Köpcke 1888, S. 373].

Dies veranlasste Köpcke zu Analysen an im Bau befindlichen Steinbrücken. Er kritisierte hierbei die mangelnde Möglichkeit, mathematische Erkenntnisse mit Erfahrungen zu untermauern. Köpcke schrieb 1877 in einem Artikel im *Civilingenieur*, dass beim Vergleich von Bauwissenschaft und Bautechnik die mathematische Berechnung gegenüber der sehr langsam wachsenden praktischen Erfahrung voraneile [Köpcke 1877b, S. 379]. Und weiter: *„Haben wir aber bei Eisenbrücken doch mindestens eine ausgedehnte Erfahrung über*

⁵⁴⁷ Vermutlich ist hier Karl Mellin gemeint, der später Geheimer Oberbaurat in Berlin war. Dies konnte aber nicht endgültig geklärt werden.

die einzelnen Elemente, aus welchen wir sie zusammensetzen und können wir aus der Uebereinstimmung zwischen der berechneten und der beobachteten Durchbiegung einige Schlüsse auf die Sicherheit der Construction ziehen, so ist dies in weit geringerem Grade bei den Gewölben und Futtermauern der Fall, bei welchen bisher noch fast keinerlei Beobachtungen zu einer Befruchtung der einseitig rechnerischen Methode der Stärkenfeststellung geführt haben. Man rechnet mit der Zerdrückungsfestigkeit, Gewicht der Steine, der Erde und deren Schüttungswinkel, folgt lediglich den Ergebnissen der Berechnung und ist ausser Stande, aus dem Verhalten eines Steinbauwerks, wenn es nicht geradezu umfällt, schief wird oder Kantenbrüche zeigt, irgend einen Schluss zu ziehen.“ [Köpcke 1877b, S. 380]. Um diesem Missstand abzuhelpen, entwickelte Köpcke empfindliche Messmethoden, um Bewegungen in Steinbrücken messen zu können.⁵⁴⁸

Dadurch veranlasst baute er erstmals bei der Eisenbahnbrücke von Langenhennersdorf auf der Strecke Pirna–Berggießhübel sowohl am Kämpfer als auch im Scheitel Steingelenke⁵⁴⁹ ein (Abbildung 7.6): Dazu krümmte er beide anliegenden Flächen in verschiedenen Radien, die eine konvex, die andere konkav, so dass sich der Bogen beim Ausrüsten um die Auflagerlinie drehen konnte. Mehrfach betont Köpcke in seinem Artikel, dass die Gelenke dazu bestimmt seien, beim Ausrüsten Drehbewegungen zu gestatten, ohne dass ungünstige Spannungsverteilungen entstehen können [Köpcke 1888, S. 375] bzw. in einem späteren Teil, dass die entstehenden Fugen mit einem Zementmörtel ausgefüllt worden seien, so dass am endgültigen Lastabtrag „auch die ganzen gekrümmten Lagerflächen Theil nehmen. Die Gewölbe sind daher nunmehr wie Bögen ohne Gelenke zu betrachten; die sämtlichen Fugen sind geschlossen.“ [Köpcke 1888, S. 376]. Köpcke baute somit provisorische Gelenke ein. Er machte sich jedoch Gedanken darüber, inwiefern die nachträglich geschlossene Kämpferfuge wie eine bereits ursprünglich geplante Einspannung betrachtet werden könne. Überlegungen zu maximalen Druckkräften unter der Annahme, dass die Lastverteilung auch nach dem Verfüllen der Fuge – und insbesondere auch nach dem Aufbringen der Aufbauten der Brücke – lediglich über die Berührungslinie erfolgt, führten ihn letztlich zum Ergebnis, dass auch in einem solchen Fall ein Versagen auszuschließen und die Anwendung von Gelenken zu empfehlen sei [Köpcke 1888, S. 376–380]. Köpcke erwähnt hier auch schon die Längenänderungen durch Temperatur und Feuchtigkeit [Köpcke 1888, S. 379],⁵⁵⁰ auf die Verwendung von permanenten Gelenken geht er aber nicht explizit ein.

Eine zweite zur gleichen Zeit auf derselben Bahnlinie erbaute Brücke nur wenige hundert Meter entfernt besteht heute nicht mehr,⁵⁵¹ allerdings stehen ihre Widerlager noch (Abbildung 7.7). Eigenartigerweise weisen die unteren Teile der Kämpfergelenke dort eine konvexe – statt konkave – Krümmung auf. Ob Köpcke einen Druckschlag baute oder ob er

⁵⁴⁸ Darüber hinaus beschreibt Köpcke auch Versuche an Zementstäben, also Probekörpern [vgl. Köpcke 1877a].

⁵⁴⁹ Vgl. Kap. 7.5.3. Beschreibung im Katalog unter Sa15.

⁵⁵⁰ Vgl. Kap. 6.2.4.

⁵⁵¹ Das Bauwerk wurde 1927–1928 durch eine zweibogige Brücke von Liebold ersetzt (Beschreibung im Katalog unter Sa16).

hier die konvexe und konkave Krümmung lediglich vertauschte, kann heute nicht mehr nachgewiesen werden. Es zeigt jedoch, dass Köpcke hier noch „ausprobierte“.

Ein anderer Pionier auf dem Gebiet des Brückenbaus war der königliche Oberbaurat Karl von Leibbrand, der in Württemberg die Untersuchung und Einführung von Gelenken vorantrieb. Auslöser war sein Brückenbau über die Nagold in Teinach im Jahr 1882. Diese Brücke sollte mit Rücksicht auf die „*ziemlich lebhaft Langholzflösserei*“ [Leibbrand 1883, S. 350] auf der Nagold mit einem einzigen Bogen ausgeführt werden.⁵⁵² Daraufhin wurde die Brücke mit einer Spannweite von 46 m zwischen den verlorenen Widerlagern, 33 m zwischen den scheinbaren Widerlagern erbaut.⁵⁵³ Es handelt sich um einen Werksteinbau mit einem Stichmaß von 3,3 m, einer Scheitelstärke von 1,0 m und 1,5 m Bogenstärke am scheinbaren Widerlager [Braun 1886, S. 571]. Die Brücke wurde auf vorbelastetem Lehrgerüst von beiden Widerlagern aus gewölbt, wobei im Kämpfer die Fugen vorerst frei gelassen wurden. Nach 23 Tagen wurde der Bogen im Scheitel geschlossen und die Fugen im Kämpfer vergossen. Während der zuständige Regierungsbaumeister Paul Braun noch behauptete, dass beim Ausrüsten keinerlei Risse entstanden seien [Braun 1886, S. 572], berichtet Karl von Leibbrand in seiner Abhandlung „*Steinbrücken mit gelenkartigen Einlagen*“: „*Trotz der sorgfältigsten Ausführung hat die Senkung des Gewölbscheitels bei dem unter Verwendung von Sandtöpfen langsam und gleichmässig vollzogenen Ausschalen 43 mm betragen, auch zeigten sich die so unerwünschten Haarrisse an der äusseren Leibung beim rechtsseitigen Kämpfer.*“ [Leibbrand 1888, S. 236]. In einer späteren Publikation wird der Schaden sogar so beschrieben: „*Beim Ausschalen zeigten sich Gewölbrisse im Scheitel und an den Kämpfern*“ [N. N. 1899b, o. S.]. Wenngleich Leibbrand diese Risse in keiner Weise als Gefahr für die Standsicherheit des Brückenbogens sah, wollte er sie doch künftig vermeiden. Leibbrand führte die Bewegungen bei weitgespannten Brückengewölben beim Ausrüsten auf das Zusammendrücken des Materials in Bogen, Fundament und Untergrund beim Herstellen des endgültigen Spannungszustandes im Bogen zurück [Leibbrand 1888, S. 236]. Diesen Vorgang konnte man nicht verhindern, man konnte ihn lediglich kontrollieren: Bei seinen folgenden Brücken baute Leibbrand Gelenke in die Scheitel- und Kämpferfugen ein, um dem jeweiligen Bogen die Bewegungen beim Ausrüsten zu erlauben und damit unkontrollierte Risse zu verhindern. Leibbrands Wahl fiel dabei auf Bleieinlagen,⁵⁵⁴ da das Blei „*für den vorliegenden Zweck die schätzenswerte Eigenschaft [besitzt, Erg. d. Verf.], dass es unter einem Druck, der seine Standfestigkeit übersteigt, seitlich ausweicht oder ausfließt und dadurch die druckübertragende Fläche so lange vergrößert, bis die Standfestigkeit des Bleis für die in demselben auftretenden grössten Inanspruchnahmen zureicht.*“ [Leibbrand o. J. (1894), S. 1]. Die erste Brücke, die er mit Bleigelenken baute, war die Brücke über die Enz bei Höfen im Jahr 1885 (Abbildung 7.9). Diese Brücke mit einer Spannweite von 41 m (sichtbare Spannweite von 28 m) bestand aus Stampfbeton- und Bruchsteinfundamenten mit aufgesetztem Bogen aus Werksteinen. Für die Ausbildung der Gelenke verwendete er 20 mm dicke Bleiplatten. Im Kämpfer

⁵⁵² Diese Brücke besteht bis heute. Durch eine im Jahr 2009 ausgeführte, massive Verbreiterung wird ihre Ästhetik allerdings stark beeinträchtigt (Abbildung 7.8).

⁵⁵³ Vgl. Fußnote 262 sowie Abbildung 7.8.

⁵⁵⁴ Näheres vgl. Kap. 7.5.2.

waren diese Platten 50 cm breit, im Scheitel 35 cm. Die einzelnen Platten wurden mit Zwischenräumen auf Dollen versetzt, durch die Zwischenräume wurde der spätere Verguss ermöglicht. Auch Leibbrands Vorrichtung war provisorisch.

Auch wenn Leibbrand seine Gelenke erst fünf Jahre nach Köpcke erstmals verwendete, war Leibbrand die Arbeit Köpckes wohl unbekannt. Er beschreibt die Überlegungen Dupuits, schließt allerdings mit der Aussage: „Ausgeführt wurden jedoch derartige Anlagen noch nie.“ [Leibbrand 1888, S. 237]. Auch Braun schrieb zur Brücke in Höfen: „Zum ersten Male wohl fanden hier Vorkehrungen zur Festlegung der Gewölbedrucklinie im mittleren Gewölbestärke-Drittel statt.“ [Braun 1886, S. 572]. Noch 1896 wird Köpcke in einem ausführlichen Artikel zu „Stein- und Betonbrücken mit gelenkartigen Einlagen“ mit keinem Wort erwähnt [Reihling 1896]. Spätestens zu diesem Zeitpunkt wehrte sich Köpcke gegen die mangelnde Beachtung seiner Leistung. In seiner Erwiderung zu Reihlings Artikel schreibt er: „Zu meinem Bedauern aber ist in dem Aufsatz unterlassen worden, zu bemerken, dass der Vorschlag, 3 Gelenke sowohl in Steingewölben wie in eisernen Hänge- und Bogenträgern anzubringen, von mir bereits früher in der Hannoverschen Zeitschrift⁵⁵⁵ veröffentlicht worden ist.“ [Köpcke 1896, S. 258]. Er merkt zwar an, dass die Art des Gelenkes eine andere sei – nämlich Blei- statt Steingelenke, „jedenfalls aber handelt es sich um die Anwendung von 3 Gelenken, welche meines Wissens von mir zuerst und in dieser Zeitschrift für Eisenträger wie für Steingewölbe vorgeschlagen und begründet worden ist. Ich darf daher wohl bitten, hiervon gefälligst Notiz zu nehmen.“ [Köpcke 1896, S. 260].

Ob Leibbrand beim Bau der Brücke in Höfen wirklich nichts von Köpckes Gelenk in Langenhennersdorf wusste, kann im Nachhinein nicht mehr festgestellt werden – aufgrund der sehr späten Publikation von Köpcke im Jahr 1888 ist es jedoch durchaus möglich. Später konstatierte Leibbrand dann jedoch, dass Köpcke als erster Gelenke eingesetzt habe [Leibbrand 1897b, S. 42].

7.3 Die weitere Entwicklung der Gelenkbogenbrücken in Deutschland

Sowohl Claus Köpcke als auch Karl von Leibbrand hatten temporäre Gelenke in ihren zuvor beschriebenen Erstlingsbauwerken eingebaut. Temporäre Gelenke wirken lediglich während des Bauprozesses, insbesondere nehmen sie die Bewegungen des Lehrgerüsts auf sowie diejenigen, die durch das Ausrüsten⁵⁵⁶ entstehen: Durch die Bündelung der Bewegungen im Gelenkpunkt wird die Rissgefahr in den anliegenden Bogenteilen minimiert. Das Ausfüllen der Gelenkfuge nach der Fertigstellung des Bogens hatte mehrere Gründe: Man versprach sich einen erhöhten Schutz des Gelenkes insbesondere gegen Witterungseinflüsse und gegen Schmutz [z. B. Leibbrand 1888, S. 242]. Weiterhin hatte man noch keine Sicherheit im Umgang mit den Bewegungsmöglichkeiten im Bogen und so versuchte man, wenigstens einen Endzustand herzustellen, bei dem die Erfahrung als Grundlage dienen konnte.

⁵⁵⁵ Gemeint ist [Köpcke 1888].

⁵⁵⁶ Vgl. Kap. 6.2.

In der Theorie wurden die Vorteile permanenter Gelenke bereits früh erkannt. Insbesondere Heinzerling hatte schon in seinem ersten Vorschlag im Jahr 1872 die wesentlichen Vorzüge benannt.⁵⁵⁷ Die Wirksamkeit der Gelenke auch nach der Fertigstellung ermöglichte es, Bewegungen durch Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen, nachgebende Widerlager, Setzungen sowie dynamische und einseitige Belastungen der fertiggestellten Brücke⁵⁵⁸ kontrolliert aufzunehmen und dadurch einer Rissbildung entgegenzuwirken. Ein weiterer wichtiger Vorteil ist, dass man den Dreigelenkbogen mit einfachen Mitteln der graphischen Statik berechnen konnte. Statisch unbestimmte Tragwerke waren wesentlich komplizierter in der Berechnung. Bis allerdings die ersten permanenten Gelenke wirklich ausgeführt wurden, vergingen noch einige Jahre.

Bereits früh kamen Zweifel daran auf, ob eine nachträglich vermörtelte Fuge dieselben Druckkräfte aufnehmen könne wie eine bereits während des Bauprozesses ausgeführte. Während Dupuit noch davon überzeugt war, dass sich die ausgefüllte Fuge durch nichts von den anderen des Bogens unterscheidet,⁵⁵⁹ gab es unter den deutschen Ingenieuren mehrfach Zweifel an dieser These. Bereits Köpcke schrieb über seine Brücke von Langenhennersdorf: *„Gleichwohl kann die Annahme nicht ganz zurückgewiesen werden, dass die Gesamtlast nach wie vor hauptsächlich oder ganz allein in den ursprünglichen Berührungsflächen wirke“* [Köpcke 1888, 376]. Von diesem Punkt der Hinterfragung der Funktion bis zum Weglassen des Mörtels ist der Schritt nicht weit: In seiner Monographie zu gewölbten Brücken aus dem Jahre 1891 beschrieb Friedrich Heinzerling ebene Brücke von Langenhennersdorf⁵⁶⁰ anhand von Unterlagen und Angaben Claus Köpckes – die Formulierungen sind größtenteils aus Köpckes Artikel entnommen. Eine interessante Abweichung gibt es jedoch. Während Köpcke lediglich die Wirkung des Mörtels in der Fuge hinterfragt und daraufhin die Druckspannung in der Berührungslinie nach der Fertigstellung der Brücke betrachtet, erwähnt Heinzerling explizit die Möglichkeit, den Mörtel von Beginn an wegzulassen und damit ein permanentes Gelenk zu bauen.⁵⁶¹ Auch andere Ingenieure widmeten sich dieser Frage, insbesondere Karl von Leibbrand, der sich ja wie Köpcke um die Einführung von Gelenken verdient gemacht hatte. In der Beschreibung zu seinen Mauerwerksbrücken zieht er das permanente Gelenk bereits vor: *„Endlich wäre noch die Frage zu erörtern, ob es zweckmässiger ist, die Bleifugen offen zu lassen oder nach Vollendung der Brücke ihre von Blei frei gebliebenen Theile mit Mörtel zu füllen. Unzweifelhaft richtiger wäre das erste Verfahren.“* [Leibbrand 1888, S. 242]. Die Mörtelfüllung sei hinsichtlich der Änderung der Stützlinie durch die Verkehrsbelastung von geringer Bedeutung, lediglich den Vorteil der *„Unveränderlichkeit der Bleieinlagen“*

⁵⁵⁷ Vgl. Kap. 7.1.

⁵⁵⁸ Vgl. Kap. 6.2.

⁵⁵⁹ Vgl. Kap. 7.1.

⁵⁶⁰ Vgl. Kap. 7.2.

⁵⁶¹ „Nimmt man an, dass die Gelenkfugen nicht mit Mörtel ausgefüllt würden, oder dass dieser Mörtel den vorausgesetzten Widerstand entweder nicht leisten könne oder allmähig – durch die Erschütterungen rissig geworden – zu leisten aufhöre, so bleibt zu untersuchen, ob die erwähnte Berührungsfläche der Gelenkfuge statt der Eigengewichtsbelastung die Gesamtlast mit Einschluss des Verkehrs aufzunehmen im Stande sei.“ [Heinzerling 1891, S. 67].

[Leibbrand 1888, S. 242], also einen Witterungsschutz der Einlagen mit Hilfe des Mörtels, hebt er hervor. Letztlich resümiert er: *„Das Füllen der Bleifugen ist zwar unbedenklich, allein es ist keineswegs unbedingt nothwendig; wo die Fugen gefüllt werden, ist dies eben noch ein Zugeständniss an die bisherige Bauweise.“* [Leibbrand 1888, S. 242]. Ausgeführt wurden seine Gelenke jedoch temporär.

Auch beim Bau der Munderkinger Donaubrücke 1893 schrieb Leibbrand zwar zum Einsatz der Gelenke, dass diese dazu dienten, die Konstruktion statisch bestimmt zu machen.⁵⁶² Zudem seien die Gelenke in der Lage, die Setzungen unschädlich zu machen. Dennoch vermörtelte Leibbrand die Gelenkfugen, wenngleich seine Gedankengänge sehr nah am permanenten Gelenk sind. Die Umhüllung der Gelenke mit Mörtel solle Gewähr dafür geben, dass die Gelenke unversehrt erhalten bleiben und im Laufe der Jahre nicht durch Rost zu Schaden kommen. *„An der Druckvertheilung im Gewölbe wird die Füllung und Umhüllung der Gelenke mit Cementmörtel nichts ändern, denn die zuvor schon vorhandene Uebertragung des Druckes auf die Gelenke wird nicht von der lose eingebrachten Mörtelfüllung aufgenommen.“* [Leibbrand 1894, S. 554–555]. Ausdrücklich beschrieb er wieder die Ausführung eines permanenten Gelenkes: Bei sorgfältiger Überwachung könnten die Gelenke auch unvermörtelt bleiben; *„es würde dies das ungehinderte Spiel des Bogens, insbesondere bei wechselnder Temperatur, das bei 50° C-Wechsel eine Bewegung des Scheitels um etwa 55 mm zur Folge hat, ermöglichen, ohne dass Nebenpressungen in dem Gewölbe auftreten.“* [Leibbrand 1894, S. 554–555]. Letztlich „denkt“ Leibbrand ein permanentes, baut aber ein temporäres Gelenk.

Als Vorläufer der permanenten Gelenke kann vielleicht die Schmiechbrücke⁵⁶³ in Ehingen aus dem Jahr 1895 betrachtet werden: Dort wurden die Gelenkfugen für fünf Jahre offen gelassen, *„da Bewegungen im Gewölbe in den ersten Jahren nicht ausgeschlossen sind“* [StASIG, Sign. Wü 65/9 T 2–4 Nr. 2072]. Erst nach Ablauf dieser fünf Jahre wurde die Gelenkfuge vermörtelt. Die Funktion des Gelenkes wurde also für das Ausrüsten sowie die in den Anfangsjahren verstärkt vorkommenden Setzungen im Bogen und im Widerlager in Anspruch genommen. Auch die Bewegungen aus Schwinden und Kriechen konnten erst durch zeitversetztes, nachträgliches Vermörteln der Gelenke unschädlich gemacht werden.⁵⁶⁴ Dennoch: Die Gelenke der Schmiechbrücke wurden vermörtelt und zählen daher zu den temporären Gelenken.

Die erste Brücke, die mit dauerhaft permanenten Gelenken geplant und gebaut wurde, war die Donaubrücke von Inzigkofen im Jahr 1895 (Abbildung 7.10–Abbildung 7.12). Deren Ingenieur Max Leibbrand hob in erster Linie den Vorteil der Berechnung hervor. Er schrieb über den Dreigelenkbogen: *„Hier liegt kein Grund vor, mit einer*

⁵⁶² „alle willkürlichen Annahmen bezüglich des Verlaufs der Druckcurven bei beliebiger Belastung der Brücke sind hierbei entbehrlich, jeder Theil der Construction kann mit der dem heutigen technischen Wissen entsprechenden Sicherheit berechnet werden.“ [Leibbrand 1894, S. 549].

⁵⁶³ Vgl. Kap. 7.5.2.

⁵⁶⁴ Vgl. „Diese nachträglichen Senkungen lehren auch, daß es bedenklich ist, da, wo die Gelenke nicht offen bleiben sollen, dieselben bald nach dem Ablassen zu schließen; es sollte dies erst, nachdem die geschilderten Volumenänderungen zur Ruhe gekommen sind, also jedenfalls erst einige Monate nach dem Ablassen geschehen.“ [Leibbrand 1895/96, S. 77].

Annäherungsrechnung sich zu begnügen, da eine statisch genau bestimmte Aufgabe vorliegt.“ [Leibbrand 1895/96, S. 67]. Weitere Vorteile lagen für Leibbrand in der Kostenersparnis durch die geringeren Abmessungen des Bogens⁵⁶⁵ und in der Kontrollierbarkeit der Bewegungen während des Ausrüstens sowie derjenigen, die durch dynamische Lasten und Temperaturveränderungen verursacht werden [Leibbrand 1896, S. 281].

Die Donaubrücke von Inzigkofen wurde aus Beton gebaut und wies eine Spannweite von 43 m auf. Wesentlich beim Entwurf war der Einsatz von drei gusseisernen permanenten Gelenken, die ein „*überraschend günstiges*“ Ergebnis beim Ausrüsten hervorriefen [Leibbrand 1896, S. 290]. Aufgrund der Gelenke wurde bei der Inzigkofener Brücke der Bogen in veränderlicher Stärke ausgeführt und zwar in der Weise, dass die Bogendicke im Scheitel 70 cm, im Kämpfer 78 cm betrug, wohingegen der Bogen im Bereich der Bruchfuge eine Abmessung von 1,1 m aufwies. Diese Verdickung der Bogenschenkel hatte statische Gründe: In den Bruchfugen herrscht die größte Momentenbeanspruchung im Bogen, was zugleich die größte Materialdicke erfordert. Die ersten gelenkigen Steinbrücken von Karl von Leibbrand wurden noch ohne diese Verdickung ausgeführt.⁵⁶⁶ Auf diese Weise war demnach die Auslastung des Materials im Bereich der Bruchfuge sehr viel größer als in den anliegenden Bogenteilen. Um eine entsprechende Sicherheit zu bekommen, musste insgesamt also ein dickerer Bogen gewählt und damit Material verschwendet werden. Um nun in allen Teilen des Bogens eine ähnliche Auslastung zu erhalten ging man dazu über, dass man die Form der Bogenschenkel anpasste. Erstmals bekannt wurde die Verdickung des Bogenschenkels bei der Donaubrücke Munderkingen. Hier beschrieb Karl von Leibbrand seine Berechnungen zur Bogenstärke so: *„In den (...) Bruchfugen (...) nähert sich die Druckcurve der inneren oder äusseren Leibung, je nachdem die eine oder andere Gewölbhälfte voll belastet ist; in beiden Bruchfugen ist nun die Gewölbdicke so vergrössert und die Form des Gewölbes so gewählt worden, dass die daselbst auftretenden grössten Beanspruchungen an der inneren und äusseren Leibung des Gewölbes gleich gross und gleich der grössten Belastung des Scheitels und Kämpfers werden“* [Leibbrand 1894, S. 550].⁵⁶⁷ Diese Verdickung der Bogenschenkel wurde in Munderkingen wie zu dieser Zeit noch üblich durch eine Verkleidung verdeckt,⁵⁶⁸ in der Folge wurde sie zum Standard für Dreigelenk-Betonbrücken.

⁵⁶⁵ Siehe weiter unten.

⁵⁶⁶ Vgl. „Bei den Steinbrücken mit Gelenkeinlagen ist man von der allgemeinen Übung, wonach die Gewölbdicke vom Scheitel gegen die Kämpfer zunimmt, nicht abgegangen; es hatte dies erhebliche Unterschiede in der Beanspruchung des Wölbmaterials in Scheitel und Kämpfer, verglichen mit den gefährlichen Fugen [Bruchfugen, Anm. d. Verf.] zur Folge.“ [Leibbrand 1897b, S. 47].

⁵⁶⁷ Weitere Beschreibung: „bei den später ausgeführten Betonbrücken sind jedoch die Gewölbestärken vom Scheitel gegen die gefährlichen Fugen wachsend und von da gegen die Kämpfer abnehmend so gestaltet worden, dass die grössten Inanspruchnahmen an sämtlichen bezeichneten Stellen annähernd gleich gross und Zugspannungen fast vollständig vermieden werden.“ [Leibbrand 1897b, S. 47].

⁵⁶⁸ Wobei darauf hingewiesen werden muss, dass die Bogenverdickung bei temporären Gelenken durchaus fragwürdig gesehen wurde. Max Leibbrand kommentierte dies 1906: „Jedenfalls aber ist es durchaus ungerechtfertigt, in solchen Fällen dem Gewölbe die für den Dreigelenkbogen erforderliche, an der Bruchfuge verdickte Form zu geben, wie dies in Munderkingen geschehen ist.“ [Leibbrand 1906b, S. 252].

Die Donaubrücke von Inzigkofen war in mancherlei Hinsicht revolutionär: Sie stellte sowohl die neuartige Konstruktion mit den offenen Gelenken und der Bogenverdickung als auch das Baumaterial Beton offen zur Schau, während beides bei zeitgenössischen Brückenbauten noch verdeckt wurde. Dementsprechend stieß die Ästhetik des Bauwerkes mit den sichtbaren Gelenken durchaus auf Kritik. In einem in der Süddeutschen Bauzeitung erschienenen Artikel ist zu lesen, dass sich die Brücke durch gusseiserne Gelenke auszeichne, *„welche hier sichtbar geblieben sind und nicht dazu beitragen, die Schönheit des Bauwerkes zu vergrößern, durchaus auch nicht in die kräftigen Formen des Steinbaues hineinpassen; überhaupt dürfte die ganze Ausbildung des Betonbogens mehr an eine Ausführung in Eisen erinnern (...)“* [Foerster 1898, S. 91]. Max Leibbrand dagegen schrieb über die architektonische Wirkung und den Verzicht auf künstlerische Ausschmückung der Brücke: *„(...) vielmehr soll das Bauwerk durch seine constructive Form, welche auch ästhetisch durchaus befriedigt, wirken. Nur an den Gewölbestirnen (...) wurden erhöhte Kreise und Füllungen angebracht, um einerseits durch diese Kreise den Wechsel der Gewölbstärke, die entgegen der üblichen Form an der Bruchfuge am grössten ist, besser in die Erscheinung treten zu lassen und um anderseits zum Ausdruck zu bringen, dass man es mit einem eingestampften Körper, nicht mit einem Quaderbau zu thun hat.“* [Leibbrand 1896, S. 282]. Es wurde also nicht nur auf eine Verkleidung verzichtet, vielmehr war der Ingenieur sogar stolz auf die konstruktiven Errungenschaften und setzte diese noch zusätzlich in Szene.

Um die vorgenannten Neuerungen noch klarer zu verstehen, lohnt sich ein Vergleich mit anderen zeitgenössischen Brücken. Verdeutlicht wird dies in der Gegenüberstellung mit der Stauffacher-Brücke⁵⁶⁹ in Zürich (Abbildung 7.13), die 1899 von Robert Maillart gebaut wurde [A. B. 1899]. Diese verfügt über einen Dreigelenkbogen aus Stampfbeton mit einer Stützweite von 39,6 m zwischen den Gelenken und einem Stichmaß von 3,7 m. Die Gelenke bestehen ebenso wie bei der Inzigkofener Brücke aus Zapfgelenken,⁵⁷⁰ auch hier ist die Fahrbahn, zumindest bereichsweise, *„auf Quermäuerchen“* [A. B. 1899, S. 83] aufgeständert, um den Aufbau möglichst leicht zu halten.⁵⁷¹ Alles in allem sind beide Brücken in Bauzeit, Abmessung und Konstruktion also durchaus vergleichbar. Während Inzigkofen jedoch die Konstruktion zeigt, werden bei der Stauffacher-Brücke sowohl Material als auch Gelenke sowie die Aufständungen auf dem Bogen durch die Natursteinverkleidung an den Stirnseiten dieser Brücke bewusst verdeckt: Es wird eine Quadermauerwerksbrücke vorgetäuscht.

⁵⁶⁹ Beschreibung im Katalog unter I23.

⁵⁷⁰ Vgl. Kap. 7.5.7.

⁵⁷¹ Die Aufständung der Fahrbahn diene in erster Linie der Gewichtsreduzierung des Aufbaus. Eine andere Möglichkeit, den Überbau leichter auszuführen, war die Übermauerung mit längsgerichteten Spandringewölben (z. B. Friedensbrücke Plauen). Zu den Vor- und Nachteilen von Aufständungen gegenüber Spandringewölben erläuterte Bock in seinem Artikel zur Leinebrücke in Grasdorf: *„Die Uebermauerung des Gewölbes ist zum Zwecke der Verminderung des Eigengewichtes in Entlastungsbögen aufgelöst. Die ästhetische Wirkung derartiger Bogenstellungen ist bekanntlich eine vorzügliche; sie verleihen der Brücke ein leichtes Aussehen und sind bezüglich einer klaren Uebertragung der Fahrbahnlasten auf den Bogenträger den längs der Brückenachse gerichteten Hohlräumen überlegen; sie tragen dagegen allerdings nicht wie die Abschlusswände der letzteren zur Versteifung des Bogens bei und bieten den schädlichen Witterungseinflüssen mehr freie Oberfläche dar, wodurch auch die Temperaturbewegungen begünstigt werden.“* [Bock, Dolezalek 1901, S. 51].

GELENKE

Dass das Verdecken der Gelenke durchaus gewollt und üblich war, zeigt auch das folgende Zitat über den Bau der Prinzregentenbrücke in München: *„Die Gelenke sollten jedoch im Interesse der architektonischen Wirkung nicht gezeigt werden. Das Scheitelgelenk konnte durch Wappenvorbauten bequem verdeckt werden, die Kämpfergelenke wurden etwas hinter die wasserseitige Flucht der Widerlager verlegt, wodurch sie leichter der Sichtbarkeit zu entziehen waren.“* [Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. (1925), S. 13–14]. Die Ansicht der Brücke (Abbildung 7.14) zeigt, dass die Konstruktion, also Gelenke und Aufständungen, verdeckt wurden. Ein weiteres Beispiel bietet die Untersicht der Maximiliansbrücke in München: Eine Ausklinkung im Stein der Bogenverkleidung kaschiert das Gelenk (Abbildung 7.15).

Betrachten wir des Weiteren den Bogen der Stauffacher-Brücke: Dieser Betonbogen hat eine Stärke von 78 cm am Scheitel, 95 cm in der Bruchfuge und 72 cm am Kämpfer [A. B. 1899, S. 83] – weist also eine Bogenverdickung in den Bruchfugen auf, wie das bei Gelenkbrücken üblich war (s. o.). In der Detailansicht des Bogens an der Stirnseite (Abbildung 7.16) kann man erkennen, dass in der Verkleidung der „Bogen“ am Scheitel sehr schmal ist, in Richtung der Kämpfer jedoch eine gleichmäßige Verbreiterung aufweist, den Bogen des Tragwerks also in keiner Weise widerspiegelt. Vielmehr wird durch die Verkleidung ein eingespannter Bogen ohne Gelenke fingiert. Während die Brücke von Inzigkofen den verdickten Bogen ausdrücklich zeigt – diesen durch die Ornamente sogar noch betont – verdeckt die Stauffacher-Brücke wiederum die technischen Gegebenheiten.

Die Verdickung des Bogens in den Bruchfugen wurde seinerzeit als ästhetisch unzulänglich betrachtet. Es gibt mehrere Äußerungen dazu, beispielhaft sei hier aus Melans Brückenbaubuch Bezug nehmend auf die Nachteile von Dreigelenkbogen zitiert: *„(...) allenfalls die unschöne Formgebung des Dreigelenkbogens, der nach statischen Anforderungen seine größte Stärke nicht an den Kämpfern, sondern in der Mitte der Gewölbschenkel erhält.“* [Melan 1911, S. 203]. Technisch war die Bogenverdickung demnach eingeführt, ästhetisch jedoch noch nicht akzeptiert. Schönbrunn schrieb in einem 1899 erschienenen Artikel über Beton-Gelenkbrücken, dass alle neueren Betonbogen die Bogenverdickung aufweisen: *„Es steht natürlich nichts im Wege, die Ansichtsflächen eines so konstruierten Gewölbes aus architektonischen Rücksichten anders zu gestalten.“* [Schönbrunn 1899; 1900, S. 411].

Vom Bau der Walnut Lane Bridge in Philadelphia⁵⁷² ist bekannt, dass diese mit eingespanntem Bogen ausgeführt wurde – obwohl der Einsatz von Gelenken aus technischen Gründen wünschenswert gewesen wäre – nur um auf die erwähnte, unerwünschte Bogenverdickung im Bereich der Bruchfugen verzichten zu können: *„Neben Rücksichten auf die Standfestigkeit haben bei der Formgebung des Hauptbogens Schönheitsrücksichten ausschlaggebend mitgesprochen. Letztere führten namentlich dazu, auf die Einlegung von Gelenken zu verzichten (...). Man zog (...) die stetig vom Scheitel zum Kämpfer anschwellende Form der durch Gelenke bedingten Verdickung der Wölbschenkel zwischen Kämpfer und Scheitel vor.“* [Fr. E. 1910, S. 41].

⁵⁷² 1906–1908, Spannweite 71 m.

Um diese Verdickung zu minimieren und trotzdem die Vorteile eines Dreigelenkbogens zu erhalten, gab es Vorschläge – und auch ausgeführte Beispiele – bei denen die Kämpfergelenke in Richtung des Scheitels in den Bogen verschoben wurden [Leibbrand 1906a, S. 589; Melan 1911, S. 203]. Das bekannteste Beispiel hierfür sind die Illerbrücken in Kempten, deren Lichtweite von 64,5 m eine Stützweite zwischen den Gelenken von etwa 50 m gegenüber steht (Abbildung 7.17).

Es gab bereits bauzeitlich kontroverse Diskussionen bezüglich der Ästhetik von Gelenkbrücken. Paul Braun, der am Bau mehrerer Donaubrücken beteiligt war, schlug schon für den unter seiner Oberleitung stehenden Bau der Munderkinger Donaubrücke permanente, unverdeckte Gelenke vor und war damit einer der Vorreiter beim Bau von Dreigelenkbrückenbogen.⁵⁷³ Braun stellte ausführliche Untersuchungen zu Dreigelenkbogen an, unter anderem verglich er die Munderkinger Donaubrücke in der Ausführung mit oder ohne Gelenke. Die Berechnung ohne Gelenke ergab große Zugspannungen, was Braun zu einem deutlichen Ergebnis kommen ließ: *„Man ersieht hieraus, dass die Herstellung dieses Gewölbes ohne Gelenke sehr fehlerhaft gewesen wäre.“* [N. N. 1899b, o. S.]. Hieraus folgend gab er die Empfehlung, zumindest alle größeren Gewölbe notwendigerweise mit Gelenken auszustatten, zweckmäßig sei es jedoch bei allen Brückengewölben. Des Weiteren hielt er permanente Gelenke bei den größeren Gewölben für zweckmäßig, während er bei kleineren Spannweiten auch das Ausbetonieren der Gelenke für zulässig hielt [N. N. 1899b, o. S.]. Braun erwies sich in der Folge auch als einer der Verfechter der sichtbaren Konstruktionen.⁵⁷⁴ Auch Max Leibbrand, der Konstrukteur der Inzigkofener Brücke, sprach sich – wenngleich einige Jahre später – ausdrücklich für das Sichtbarmachen der Konstruktion aus: *„Man hat äußerlich auch den Gelenkbrücken zumeist die Form von gelenklosen Brücken gegeben in der Meinung, daß die Verdickung des Gewölbes in der Bruchfuge unschön wirke; letzteres wird zuzugeben sein, wenn die Gelenke verdeckt sind, da dann eine solche Verdickung unverständlich bleibt. Ich habe bei den von mir ausgeführten großen Gelenkbrücken die Gelenke unverdeckt gelassen und den Gewölben die rechnermäßig ermittelte Form gegeben. Diese Formgebung, weit entfernt, unschön zu wirken, ist nicht ohne besonderen Reiz und hat rasch Beifall gewonnen.“* [Leibbrand 1906a, S. 640].⁵⁷⁵

⁵⁷³ Vgl. „Es wird die Zeit nicht mehr fern sein, in der durch bleibende, zweckentsprechend ausgeführte, sichtbare Kämpfergelenke die Wärmebewegungen weit gesprengter flacher Stein- und Betonbögen unschädlich gemacht werden.“ [Braun 1893, S. 446] oder „Herr Bau-Inspektor Braun bringt in Vorschlag, die Gelenke so auszuführen, dass sie immer sichtbar sind und bleibend wirken.“ [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 109].

⁵⁷⁴ Vgl. beispielsweise die Aussage von Braun: „Da wo nun Gelenke für die Wärmebeanspruchung notwendig sind, scheint es mir geboten, dies auch äusserlich, sowohl durch die Sichtbarlassung der Gelenke, als auch durch die Anwendung der 2 gegeneinander gelegten Sichelhalbbögen zum Ausdruck zu bringen. Was konstruktiv richtig ist, soll nicht verdeckt, sondern gezeigt werden, das Auge wird sich bald an diese Abweichungen vom Althergebrachten gewöhnen und die Ästhetik kann dabei zweifellos voll und ganz befriedigt werden!“ [N. N. 1899b, o. S.].

⁵⁷⁵ Weiteres Beispiel: „Mit der Zeit aber wird man sich an die heute noch ungewohnte, dem Laien unverständliche, statisch richtige Bogenform gewöhnen, wie man sich an den Anblick verschiedener Formen eiserner Brücken und selbst an den von Gelenken, selbst eisernen in Steinbrücken, gewöhnt hat.“ [W. 1899, S. 105].

Im Zusammenhang mit der Verwendung von Gelenken soll hier auch noch das Thema der Bewegungsfugen im Überbau betrachtet werden: In der praktischen Anwendung von Gelenken zeigte sich, dass es nicht ausreichte, lediglich den Bogen beweglich zu gestalten, sondern dass auch der Überbau rissgefährdet war. Traf man dagegen keine Vorkehrungen, so entstanden hier unschöne Risse. Abbildung 7.18 zeigt einen Bogen ohne Gelenke, der durch die Spannungen im Überbau große Risse aufweist.

Zur Vermeidung dieser „*zweifellos entstehende*[n, Erg. d. Verf.] *Dilatationsfuge*“ [Magens 1897, S. 45] wurden Bewegungsfugen direkt über den Gelenken jeweils im Scheitel und im Kämpfer ausgeführt. Diese zogen sich durch den ganzen Aufbau und ließen die Drehbewegungen zu. Anfangs – bei der Ausführung temporärer Gelenke – wurden diese Fugen noch vermörtelt.⁵⁷⁶ Bei der Verwendung von permanenten Gelenken mussten auch die Dilatationsfugen dauerhaft ausgeführt werden, um die Temperaturänderungen usw. rissfrei aufnehmen zu können.⁵⁷⁷ Braun ging hier sogar noch weiter, er empfahl Dilatationsfugen in den Gewölbeaufbauten bei „*allen Gewölben im Freien*“, unabhängig vom Einsatz von Gelenken [N. N. 1899b, o. S.]. Einige Beispiele solcher Dilatationsfugen bei bestehenden Brücken sind in Abbildung 7.19 dargestellt: In Teilabbildung a ist eine offene Fuge zu sehen, die gut sichtbar den Bogen mitsamt des Aufbaus vom Pfeiler trennt. Abbildung 7.19b zeigt indes die bereits angesprochene Neigung zum Verdecken der Konstruktion: Nur bei genauem Hinschauen erkennt man die Dilatationsfuge, die durch die Pfeilervorlage zwar nicht verdeckt, aber dennoch in den Hintergrund gedrängt wird. Noch weiter geht das Beispiel in Teilabbildung c: Ebenso wie dies bereits weiter oben bei der Prinzregentenbrücke in München beschrieben wurde (Abbildung 7.14), wurden die Gelenke häufig hinter die Pfeilervorlagen zurückgesetzt, um die Dilatationsfugen nicht in der Ansichtsfläche zu haben: Die Abbildung 7.19c zeigt die Stauffacher Brücke, die auch bezüglich der Dilatationsfugen wiederum die Konstruktion verdeckt.⁵⁷⁸ Und letztlich zeigt Abbildung 7.19d ein durch das Erdreich verdecktes Gelenk, das lediglich durch die überirdisch sichtbare Dilatationsfuge erkennbar ist.

Wenngleich der Einsatz der Gelenke immer weiter voranschritt und der Dreigelenkbogen um die Jahrhundertwende zur Standardbauweise für Bogenbrücken avancierte, gab es dennoch auch Gegenstimmen zur Verwendung von Gelenken. Bereits zu Leibbrands ersten Gelenkbrücken gab es Widerstand. Der Stuttgarter Baurat Rheinhard schrieb beispielsweise in einem Artikel im Centralblatt der Bauverwaltung über seine Murgbrücke in Heselbach, die ohne gelenkige Einlagen gebaut wurde: „*Auch das dürfte hierdurch erwiesen sein, dass bei einem derartig hergestellten Gewölbe* [mit offenen Fugen, Anm. d.

⁵⁷⁶ Vgl. die Aussage von Karl von Leibbrand: „Über den Gelenkfugen blieben Mauer- oder Betonschlitzte offen, damit sich das Gewölbe ungehindert bei der zunehmenden Belastung zu bewegen vermochte; diese Schlitzte wurden erst geschlossen, wenn die Gelenkfuge neben den Bleiplatten vollständig gefüllt war, was geschah, wenn nahezu die ganze Last auf das Gewölbe aufgebracht war, welche es künftig zu tragen hatte. Zur Füllung der Gelenkfugen wurde dünnflüssiger Portland-Cement-Mörtel verwendet.“ [Leibbrand 1897b, S. 48].

⁵⁷⁷ „Die oben erwähnten Schlitzte in den Stirnmauern und den Zwischenmauern der Entlastungsgewölbe, welche insbesondere das ungehinderte Spiel der Brücke bei Temperaturschwankungen sichern, sind bei späteren Brückenausführungen in der erforderlichen Weite offen belassen worden.“ [Leibbrand 1897b, S. 48].

⁵⁷⁸ Karl von Leibbrand bemerkte zum Verdecken der Dilatationsfugen: „durch entsprechend anzuordnende Vorsprünge können die Temperaturschlitzte leicht verdeckt werden.“ [Leibbrand 1897b, S. 86].

Verf.] *alle künstlichen, dem Wesen des Steinbaues fremden Mittel, wie z. B. eiserne Gelenke, Bleiplatten und dergl., welche angeblich eine richtige Druckverteilung herstellen sollen, ebenso entbehrlich sind, wie die Sandtöpfe zum Ausschalen, welche hier einen Mehraufwand von 400 M verursacht hätten.*“ [Rheinhard 1887, S. 340]. Kann man diese Aussage noch auf die anfängliche Unsicherheit im praktischen Umgang mit Gelenken zurückführen, so gab es aber auch in späteren Jahren durchaus Stimmen gegen die Verwendung von Gelenken: Eugen Dyckerhoff berichtete in der Versammlung des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894 vom Bau mehrerer Stampfbetonbrücken über die Weißeritz in Dresden und bemerkte hierbei, dass diese ohne Gelenke, jedoch mit Fugen im Scheitel und an den Kämpfern ausgeführt seien, die nach Fertigstellung der Betonarbeiten am Bogen verfüllt wurden [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 113]. Mit diesen Aussparungen seien solch geringe Bewegungen im Gerüst aufgetreten, dass er den Einsatz von Gelenken nicht für erforderlich hielt. Auch die Bewegungen aus Temperaturänderungen hielt er für vernachlässigbar und die Elastizität der Baustoffe für groß genug, um diese rissfrei aufzunehmen [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 113]. Anton Hoch, Direktor der Zementfabriken in Blaubeuren, Allmendingen und Ehingen, hielt dem im folgenden Jahr 1895 – nach der Besichtigung der Dyckerhoffschen Brücken in Dresden – entgegen, er habe aufs Neue die Überzeugung gewonnen, dass Gelenke auch schon bei Brückenbögen von nur 20 m Spannweite unbedingt notwendig seien. Denn auch die Dresdner Brücken haben Risse gezeigt. *„Selbstverständlich bilden diese Risse keine Gefahr für das Bauwesen. Aber, m. H., was bei einer Brücke von 20 m Spannweite unschädlich ist, kann bei Bögen mit 50 m Spannweite doch schon recht schädlich wirken. Ich möchte daher bei Ausführung von Brückenbögen mit grosser Spannweite und geringer Pfeilhöhe stets empfehlen, Bogengelenke anzuwenden, wie solche durch Herrn Präsident v. Leibbrand erfunden und bei einer grossen Anzahl von Brücken mit bestem Erfolge ausgeführt worden sind.*“ [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1895, S. 133–135].

Während Dyckerhoff jedoch die Gelenke lediglich für nicht erforderlich hielt, gab es auch vermehrt Stimmen, die den Einsatz von Gelenken sogar für schädlich erachteten: Noch 1899, Gelenke in Stein- und Betonbrücken waren in Deutschland bereits vielfach ausgeführt und etabliert, schrieb Georg Mehrrens in dem von ihm bearbeiteten Abschnitt des Handbuches für Ingenieurwissenschaften, dass der Einbau von Gelenken in Massivbrücken nicht notwendig sei, im Gegenteil sogar eine Schwachstelle für den Bogen bedeute. Er hielt *„ein Scheitelgelenk für eine der Eigenart des steinernen Bogens fremde und mit ihr wenig vereinbare Konstruktion.*“ [Landsberg 1899, S. 308]. Wenn überhaupt, seien Gelenke nur während der Herstellung von Nutzen, es genüge aber, diese durch offene Fugen oder Lücken zu bilden. Diese seien vor dem Ausrüsten möglichst vollständig wieder zu verschließen. Auch der im Massivbrückenbau durchaus verdiente E. H. Hoffmann wird wie folgt zitiert: *„Hoffmann verwirft die Anwendung von Gelenken in allen Fällen entschieden als etwas dem Gewölbebau durchaus Fremdes.*“ [Krone 1899, S. 271].

Trotz des Gegenwindes wurde der Einsatz permanenter Gelenke um die Jahrhundertwende üblich, insbesondere wenn die Spannweite es erforderte. So schrieb beispielsweise Max Leibbrand, die Ausführung mit dauernd offenen Gelenken, welche alle

Unklarheiten bezüglich der Beanspruchung vermeide, sei entschieden vorzuziehen und werde bei großen flachen Gewölben „*jetzt meist angewandt*.“ [Leibbrand 1906b, S. 252].⁵⁷⁹

Gründe für das Weglassen von Gelenken gab es lediglich in Anwendungsbereichen, in denen ein Gelenk eher ungünstig wirkte.⁵⁸⁰ Andere Gründe gegen die Verwendung von Gelenken konnte z. B. eine tiefliegende Kämpferlinie sein, die wegen der Hochwassergefährdung ein gewisses Risiko des Einfrierens der Gelenke barg [Bsp. bei Pappit 1909]. Ein Beispiel, bei dem der Einsatz von Gelenken bereits beim Bau negative Auswirkungen hatte, beschreibt Theodor Böhm in Bezug auf den Bau der Bahnlinie Altenburg–Langenleuba-Oberhain [Böhm 1904].⁵⁸¹ Im Verlauf dieser Strecke wurden zwischen 1899 und 1901 fünf große Viadukte mit bis zu 17 Bogen aus Stampfbeton mit teilweisen Ziegelverblendungen erbaut. Die Bogen erhielten Gelenke aus Beton (Abbildung 7.20 und Abbildung 7.21).⁵⁸² Aufgrund der schwierigen Untergrundverhältnisse kam es wiederholt zu ungleichmäßigen Setzungen, was sich durch den Einsatz der Gelenke in den mittleren Bogen als unproblematisch erwies. An den Widerlagern der Endbogen ergaben sich durch die Bedingungen jedoch große Probleme: Durch eine längere Regenperiode waren die anschließenden Bahndämme aufgeweicht worden und die Erdmassen übten deshalb einen erhöhten Druck auf die Widerlager aus. Die bei vier der fünf Bauwerke ausgeführten schrägen Flügelmauern (Abbildung 7.21, Teilabb. 5) konnten diesem Druck nicht standhalten. Die Folge war ein Zusammenrücken der Widerlager. Infolgedessen kam es zu Schäden in den Stirnwänden wie auch in den Bogen selbst. Letztlich konnte das Problem nur durch Ausstampfen der Gelenke sowie der Dilatationsfugen in den Endbogen gelöst werden. Die Endbogen bildeten dann mit den nächstliegenden Bogen, die bereits ohne Gelenke geplant waren, einen ausreichend steifen Baukörper, um den Erddruck aufnehmen zu können [Böhm 1904, S. 38]. Böhm zog das Fazit, dass Gelenke lediglich bei unnachgiebigen Widerlagern von Nutzen seien, in allen anderen Fällen jedoch verhängnisvoll wirken können [Böhm 1904, S. 38].

Sicherlich war in Deutschland der Gebrauch von Gelenken überproportional vorhanden, teilweise auch bei Brücken, bei denen deren Anwendung nicht notwendig gewesen wäre. Der Hauptgrund für die standardmäßige Verwendung von Gelenken war die im Kap. 6.2.4 beschriebene Überbewertung der Temperaturänderungen. Emperger schrieb dazu 1909 in Bezug auf einen Brückentwurf mit Spannweiten von 15 m, bei dem eine Temperaturschwankung von 80° C ausgeschrieben war: „*Die Verwendung eines Dreigelenkbogens unter diesen Umständen ist wohl kaum zu billigen und nur ein Symptom dieser krankhaft überspannten Anschauungen*.“ [Emperger 1909b, S. 350]. Die Verwendung von Gelenken habe durch derartige Bestimmungen eine weit über die eigentliche Berechtigung hinausgehende Bedeutung erhalten. Ihre Verwendung bewirke eine Verteuerung des Bauwerks. „*Es sei deshalb betont, daß ein Mauerwerksbogen durch den*

⁵⁷⁹ Vgl. auch: „Eingespannte Stampfbetonbogen werden daher in neuerer Zeit nicht mehr ausgeführt, außer für kleinere Spannweiten. Ganz anders verhält es sich mit den Stampfbetonbrücken mit drei Gelenken.“ [Emperger 1908a, S. 10].

⁵⁸⁰ Z. B. bei schiefen Brücken, vgl. Kap. 7.7.

⁵⁸¹ Beschreibung im Katalog unter D8. Vgl. auch [Büsing 1905, S. 481].

⁵⁸² Vgl. Kap. 7.5.3.

Gebrauch von Gelenken seinen eigentlichen Charakter einbüßt, und daß es das Ziel jedes Konstrukteurs sein muß, gewöhnlich ohne dieselben auszukommen und sie nur in Ausnahmefällen zu benutzen.“ [Emperger 1909b, S. 350].⁵⁸³ Und auch Kollmar schrieb in seiner 1919 publizierte Dissertation über die Anwendung von Gelenken, dass Gelenke wohl vielfach hätten entbehrt werden können. Man solle stets bedenken, dass diese Schwachpunkte im Bogen darstellen, so dass man sie am treffendsten als notwendiges Übel bezeichnen könne. Sie seien zwar bei schlechtem Baugrund oder sehr flachem Pfeilverhältnis unentbehrlich. In allen anderen Fällen solle man sich jedoch den im Massivbau so schätzenswerten Vorteil der Einheitlichkeit und Steifigkeit nicht entgehen lassen [Kollmar 1919, S. 5].

Wie zuvor eingehend beschrieben, gab es in Deutschland eine rasante Entwicklung vom ersten Einsatz temporärer Gelenke (1880, Langenhennersdorf) über die erste Anwendung permanenter Gelenke (1895, Inzigkofen) bis hin zur standardmäßigen Verwendung von Dreigelenkbrücken um die Jahrhundertwende. Hierzulande wurde der Dreigelenkbogen zum Anfang des 20. Jahrhunderts im Massivbrückenbau fast ausschließlich verwendet. Eine völlig gegensätzliche Entwicklung erlebte Frankreich: Dort wurde das Gelenk zwar „erfunden“ – in der praktischen Anwendung jedoch herrschte in Frankreich großes Misstrauen. Dieser Umstand soll daher im nächsten Kapitel erörtert werden.

7.4 Die Anwendung von Gelenken: Zur gegensätzlichen Entwicklung in Frankreich und Deutschland

*„1870 schlug Dupuit als erster vor, Gewölbe mit Gelenken auszustatten. Von dieser französischen Idee hat man in Frankreich wenig oder schlecht gesprochen: Man hat sie nicht ausgeführt. In Deutschland jedoch wurde sie sehr gut angenommen: Seit etwa 30 Jahren baut man dort Gewölbe mit Gelenken.“*⁵⁸⁴ [Séjourné 1913d, S. 3].

Dieses Zitat von Paul Séjourné aus dem Jahr 1913 fasst die französische Entwicklung zur Anwendung von Gelenken bereits sehr gut zusammen. Waren die Franzosen im Bau weitgespannter Steinbrücken wahre Meister ihres Faches und ist Jules Dupuit mit seinem Vorschlag als Vorreiter der Gelenkentwicklung im Massivbrückenbau zu benennen, so war Frankreich im praktischen Einsatz von Gelenken weit rückständig.

⁵⁸³ Auch Mehrtens, der sich seit jeher als Kritiker der Verwendung von Gelenken zeigte, formuliert 1908 in den Vorlesungen zum Brückenbau: „Denn in Deutschland beginnt neuerdings die Sucht, womöglich in jede Betonbrücke Gelenke einzulegen, ernsthafte Bedenken zu erregen. Gut gebaute und gut unterhaltene Steinbrücken haben viele Jahrhunderte überlebt und besaßen keine Gelenke. Warum sollten das unsere Betonbrücken nicht auch können? Deutsche Ingenieure, die ohne zwingende Gründe, Gewölbe mit drei Gelenken herstellen, (...) sollten doch stutzig werden, wenn sie sehen, wie gering man in Frankreich, dem Vaterlande der Steinbaukunst, den Gebrauch von Gelenken seit Jahrzehnten bewertet hat.“ [Mehrtens 1908, S. 759–760].

⁵⁸⁴ Original: „En 1870, Dupuit proposa, le premier, d’articuler les voûtes. De cette idée française, on a en France peu ou mal parlé: on ne l’y applique point. Mais, en Allemagne, on l’a fort bien accueillie: depuis quelque 30 ans, on y articule les voûtes.“

Nach den bereits beschriebenen Untersuchungen zum Pont de Tolbiac von Gustave Brosselin⁵⁸⁵ schien das Thema Gelenke in Frankreich brachzuliegen. Erst 1885 äußerte sich Louis Philippe Croizette-Desnoyers in seiner Monographie „*Cours de construction des ponts*“ über den Einsatz von Gelenken, allerdings hielt er im Gegensatz zu deren Einsatz in eisernen Brücken die Gelenke in Massivbrücken für nicht empfehlenswert. Diese bieten bei sorgfältigem Umgang Vorteile bei eisernen Brücken. Die Anwendbarkeit bei Massivbrücken sei aber nicht gegeben [Croizette-Desnoyers 1885, S. 325–326].⁵⁸⁶

Nach diesem durchaus vernichtenden Urteil dem Einsatz von Gelenken gegenüber dauerte es wiederum einige Jahre, bis mit Gaston Jean La Rivière erneut ein französischer Ingenieur über die Anwendung von Gelenken schrieb, allerdings hatte auch er keine eigenen Erfahrungen erlangt, sondern beschrieb die Brückenbauten von Karl von Leibbrand.⁵⁸⁷ Dabei ist sein Grundtenor durchaus positiv. Er beschreibt hier in Kurzform die fünf Brücken und geht ausführlicher auf Ausbildung und Funktion der Bleigelenke ein. Viel wichtiger erscheint ihm jedoch die Tatsache, dass die geistige Leistung den französischen Ingenieuren zugesprochen werden muss: „*Es sollte allerdings vorab eine Tatsache festgehalten werden, die gänzlich zur Ehre unseres Landes gereicht und zwar wie sehr die deutschen Ingenieure in der Ausführung der bei ihnen noch nie dagewesenen Bauwerke beeinflusst wurden von den Forschungen französischer Ingenieure sowie der Prinzipien, die in Frankreich in den Massivbrückenbau eingeführt wurden.*“⁵⁸⁸ [La Rivière 1891, S. 900]. Man sehe auf jeder Seite des verwendeten Artikels⁵⁸⁹ die Errungenschaften von Dupuit, Romany, Séjourné und Flamant⁵⁹⁰ zitiert. Weiterhin bemerkte er zum Schluss seiner Ausarbeitung, dass er die Schriften von Brosselin erst nach Fertigstellung seines Artikels zur Kenntnis erhalten habe. Er hebt in einer ausführlichen Ergänzung

⁵⁸⁵ Ausführlich vgl. Kap. 7.1.

⁵⁸⁶ „Denn 1. kann man im Bogenquerschnitt, anders als bei den eisernen Brücken, keine zum eisernen Zapfen passende Stelle finden; 2. bildet das Mauerwerk keine einheitliche Masse mit perfektem Zusammenhalt in allen seinen Teilen, wie das bei einem eisernen Bogen der Fall ist; 3. schließlich ist die Beweglichkeit, die ein gelenkiges System charakterisiert, grundsätzlich unvereinbar mit der Natur des Mauerwerks, das eine große Steifigkeit benötigt und dessen Widerstandskraft sich nur derselben wegen mit den Jahren vergrößert.“ Original (im Zusammenhang): „Le système des articulations présente des avantages, et on a lieu de penser que l’usage s’en multipliera de plus en plus pour les ponts en métal, sous réserve de l’employer avec prudence. Mais les considérations précédentes ne nous paraissent pas applicables aux ponts en maçonnerie. En effet, 1° on ne pourrait plus, comme pour les ponts en métal, retrouver sur la largeur du tourillon une surface analogue à la section de l’arc; 2° les maçonneries ne forment pas une masse unique et parfaitement reliée dans toutes ses parties, comme un arc en métal; 3° enfin, la mobilité qui caractérise les systèmes articulés est essentiellement contraire à la nature des maçonneries, qui ont besoin d’une grande fixité et dont la résistance n’augmente avec les années que par suite de cette fixité même.“

⁵⁸⁷ Vgl. Kap. 7.2.

⁵⁸⁸ Original (im Zusammenhang): „Il y a lieu cependant de constater tout d’abord un fait qui est entièrement à l’honneur de notre pays, c’est à quel point les ingénieurs allemands, ayant à exécuter des ouvrages qui étaient pour ainsi dire sans précédents chez eux, se sont inspirés des recherches des ingénieurs français et des principes admis en France dans la construction des ponts en maçonnerie; en parcourant le mémoire très détaillé dans lequel j’ai puisé les renseignements qui font l’objet de la présente note, on voit cités à chaque page le *Traité de l’équilibre des voûtes* de Dupuit, les mémoires insérés aux *Annales des ponts et chaussées* de 1868 [sic] par M. Romany, de 1886 de M. Séjourné, dont les grands ouvrages sont connus en Allemagne comme en France, de 1887, par M. Flamant.“

⁵⁸⁹ Gemeint ist [Leibbrand 1888].

⁵⁹⁰ Gemeint sind [Dupuit 1870], [Féline-Romany 1866], [Séjourné 1886] und [Flamant 1887].

ausdrücklich hervor, dass auch die Erfindung der Gelenkeinlagen eine französische sei: Brosselin habe eine Anordnung beschrieben, „die ganz und gar derjenigen entspricht, die in Deutschland ausgeführt wurde. (...). Er hat sowohl die Theorie als auch die Anwendung dieser Bauweise untersucht und das mit sehr großer Klarheit und Präzision, es fehlte an nichts außer der praktischen Umsetzung, weswegen ihm ohne jeglichen Zweifel das Anrecht zusteht, ihr Erfinder zu sein.“⁵⁹¹ [La Rivière 1891, S. 929].

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts steigerte sich das Interesse für die ausgeführten Bogenbrücken mit drei Gelenken; zahlreiche Artikel über die im benachbarten Ausland ausgeführten gelenkigen Bogenbrücken folgten in kurzen Abständen in den einschlägigen französischsprachigen Zeitschriften. Fest steht, dass die französischen Ingenieure die deutschen „Schlüsselbauwerke“ Munderkingen, Inzigkofen und auch Imnau sowie den Schweizer Pont de la Coulouvrenière in Genf kannten. Von allen gibt es ausführliche Berichte in französischer Sprache.⁵⁹²

Die Schweiz ist aufgrund des Umstandes, dass dort beide Sprachen – also sowohl Deutsch als auch Französisch – gesprochen werden in dieser Betrachtung über die gegensätzliche Entwicklung in Deutschland und in Frankreich von gewissem Interesse. Dort beobachtete man ebenso die Entwicklungen beider Nachbarländer, in einem Artikel in der Schweizerischen Bauzeitung von 1900 findet man folgenden Kommentar: „Nachdem Deutschland mit der Verwendung von Gelenken in steinernen Brücken den Anfang gemacht, beginnen auch die französischen Ingenieure, die im Bau weitgespannter steinerner Gewölbe so Glänzendes geleistet, sich mit dieser Frage zu beschäftigen.“ [A. 1900, S. 151].

In der Schweiz ist die bedeutendste frühe Dreigelenkbogenbrücke der Pont de la Coulouvrenière⁵⁹³ in Genf. Er wurde im Jahr 1896 gebaut und mit Gelenken in gleicher Bauart wie in Munderkingen versehen. Diese Brücke kann als Beginn des massiven Dreigelenkbogens in der Schweiz betrachtet werden, zudem kann damit konstatiert werden, dass die Schweiz die technischen Fortschritte in Deutschland verfolgte und auch anwandte – im Gegensatz zu den französischen Ingenieuren. In den Folgejahren ist es auch der bekannte Schweizer Ingenieur Robert Maillart, der Dreigelenkbogenbrücken ausführt. Hier zu nennen sind insbesondere die Stauffacher-Brücke in Zürich und die Innbrücke in Zuoz.⁵⁹⁴ Über die letztgenannte gibt es allerdings noch im Jahre 1903 eine wahre Hetzjagd in der französischen Zeitschrift „Le Béton Armé“, welche das Organ der Hennebique-Konzessionäre in Frankreich darstellt. Der Autor des Artikels macht sich regelrecht lustig

⁵⁹¹ Vgl. Kap. 7.1; Original: „nous ajouterons que, si les ingénieurs allemands ont la priorité de son application, ils n'ont pas eu en réalité celle de l'idée première ni même de l'étude théorique détaillée du procédé: dès 1878, en effet, c'est-à-dire plusieurs années avant la construction des beaux ouvrages exécutés par M. Leibbrand, M. Brosselin, aujourd'hui inspecteur général des Ponts et Chaussées, avait proposé pour la construction du pont de Tolbiac une disposition spéciale qui est absolument celle appliquée depuis Allemagne. (...) Il [Brosselin, Anm. d. Verf.] avait étudié la théorie et l'application de ce procédé avec une netteté et une précision très grandes, aux-quelles il n'a manqué que la mise en pratique pour que la priorité de l'invention puisse lui être attribuée sans aucune contestation.“

⁵⁹² Vgl. zu Munderkingen: [N. N. 1894c] und [Humbert 1897], zu Inzigkofen: [A. B. 1897], zu Imnau: [Gaedertz 1898] sowie zum Pont de la Coulouvrenière: [Berthier 1896].

⁵⁹³ Vgl. Kap. 7.5.4.

⁵⁹⁴ Stauffacher Brücke 1899, vgl. Kap. 7.3. Innbrücke in Zuoz von 1901.

über Maillarts Konstruktion in Zuoz: „Trotz alledem scheint sie von anfälliger Konstitution, diese gelenkige Brücke von Zuoz. Und Welch sonderbarer Gedanke seitens ihrer Urheber, ihre Einheit in vier Teile zu zerschneiden. Es soll sogar Leute geben, die Haare gevierteilt haben... Gibt es da etwa einen Zusammenhang zwischen beiden?“⁵⁹⁵ [Gallotti 1903, S. 171]. Weitere Ausschnitte aus diesem Artikel zeigen die tiefe Ablehnung dieser Bauweise: „Es ist diese Gelenktheorie, die vernebelte und verwickelte, nach Neuheiten hungernde Geister in Deutschland und in der Schweiz auch auf den Stahlbeton anwenden wollten. Glücklicherweise ist dies nicht in unserem Lande passiert und wir wollen hoffen, dass dies hier auch nie versucht wird.“⁵⁹⁶ [Gallotti 1903, S. 168]. Die wichtigste Eigenschaft eines Stahlbetonbauwerkes sei dessen absolute Einheit, „die zwischen all seinen Teilen herrscht und damit einen perfekten Monolithen darstellt, sofern es nach den Regeln der Vernunft geplant und von der Erfahrung bestätigt ist.“⁵⁹⁷ [Gallotti 1903, S. 167]. Wenngleich dieser Artikel den Dreigelenkbogen zutiefst geringschätzt, so ist er doch als Ausnahme zu werten. Die meisten der französischen Artikel zeugen zumindest vom Interesse der Ingenieure an den Gelenken.

Während die weiter oben genannten Artikel über die deutschen und Schweizer Schlüsselbauwerke Munderkingen, Inzigkofen, Imnau sowie Genf meist lediglich von den Bauten und deren Ausführung berichten, ist es in Frankreich zunächst Jean Baptiste Bourdelles im Jahre 1898, der sich wieder intensiv eigene Gedanken zum Gelenke-Thema macht. Er ruft seine Landsleute regelrecht dazu auf, dem Dreigelenkbogen mehr Aufmerksamkeit entgegenzubringen. Diese Brücken haben „exzellente Resultate gezeigt, sowohl in wirtschaftlicher Hinsicht als auch was die Schnelligkeit der Ausführung angeht. Heute haben sie durch genügende Erfahrung Anerkennung erlangt und man stellt ihre zahlreichen Vorteile nicht mehr in Frage, zumindest nicht in Deutschland. Die Frage verdient die ernsthafte Aufmerksamkeit der französischen Ingenieure, wo der Dreigelenkbogen in unverdienter Vergessenheit belassen wird.“ [Bourdelles 1898, S. 34–35]. Die vorliegende Studie habe zum Ziel, die Überlegenheit des Dreigelenkbogens insbesondere bei flachen, weitgespannten Brücken aufzuzeigen [Bourdelles 1898, S. 34–35].⁵⁹⁸ Auch er spricht die

⁵⁹⁵ Original: „C'est que, malgré tout, il paraît de complexion délicate, le pont rotuleux de Zuos. Aussi quelle idée bizarre de la part de ses auteurs de lui couper en quatre sa solidarité. Nous connaissons déjà les gens qui coupent les cheveux en quatre. Y aurait-il identité entre les uns et les autres?“

⁵⁹⁶ Original: „C'est cette théorie des rotules que des cerveaux nébuleux et compliqués, affamés de nouveautés, ont voulu appliquer au Béton armé en Allemagne et en Suisse. Ce n'est heureusement pas dans notre pays que ces applications se sont produites et nous voulons espérer qu'elles n'y seront pas tentées.“

⁵⁹⁷ Original: „Ces deux termes assemblés rappellent immédiatement à l'esprit des gens de métier la fameuse union de la Carpe et du Lapin, et ce n'est pas sans quelque curiosité mêlée d'appréhension qu'on se demandait, depuis qu'on parlait de réaliser cette conception, au moins bizarre, le résultat qui pourrait bien en advenir. Les constructeurs qui, jusqu'ici ont pratiqué le Béton armé, qui, en ont fait des applications sérieuses et importantes, sont unanimes à reconnaître que la qualité maîtresse d'un ouvrage en Béton armé est l'absolue solidarité qui règne entre toutes ses parties et en fait un monolithe parfait, si d'ailleurs il est construit selon des règles rationnelles, sanctionnés par l'expérience.“

⁵⁹⁸ Original im Zusammenhang: „Tous ces ouvrages, construits le plus souvent en béton maigre de ciment et avec des épaisseurs relativement faibles, ont donné, paraît-il, d'excellents résultats au point de vue surtout de l'économie et de la rapidité d'exécution. Ils ont acquis aujourd'hui la sanction d'une assez longue expérience, et l'on ne met plus en question, au moins en Allemagne, leurs nombreux avantages. La question mérite donc de fixer sérieusement l'attention des Ingénieurs, en France, où le système de la triple articulation est laissé dans un oubli immérité. C'est dans ce pays, cependant, qu'il a été en premier lieu préconisé, et on est même en droit de dire, qu'en ce qui concerne les voûtes en maçonnerie, M. Brosselin en est le véritable promoteur. L'étude

genannten Brückenbauwerke an, widmet sich dann aber auch einem ausführlichen Vergleich von eingespannten und gelenkigen Bogen, verschiedenen Gelenkausführungen und den Vor- und Nachteilen von Dreigelenkbogen. Sein Resümee ist klar: *„Zusammenfassend kann man sagen, dass der Dreigelenkbogen unter den beschriebenen Rahmenbedingungen besser als jedes andere System dazu geeignet ist, dem Mauerwerksbogen seine wesentlichen Eigenschaften zu geben, nämlich die Sicherheit der Ausführung sowie die Leichtigkeit der Konstruktion. Derartige Vorteile, und diese in beiderlei Hinsicht, lassen es unmöglich erscheinen, dass sie noch länger unerkannt bleiben.“*⁵⁹⁹ [Bourdelles 1898, S. 60].

Ein weiterer wichtiger Name in der französischen Entwicklungsgeschichte ist Henri Jacques Tavernier. Im Jahr 1899 veröffentlicht er einen ausführlichen Artikel über die Gelenke, dabei spricht er erneut die bekannten deutschen Objekte an. Er resümiert: *„Zusammenfassend kann man sagen, dass die Anwendung von drei Gelenken in Mauerwerksbögen die Unwegsamkeiten komplett beseitigt, die in den eingespannten Bogen wegen der Angriffspunkte der Stützlinie im Scheitel und in den Bruchfugen herrschen.“*⁶⁰⁰ [Tavernier 1899, S. 83]. Tavernier baute in der Folge einen 15 m weiten Versuchsbogen aus Werkstein, dabei schlug er vor, die Fugen nicht mit Mörtel auszuführen, sondern mit Metall auszugießen. Er verglich daher die Eigenschaften mehrerer Metalle hinsichtlich Schmelzpunkts, Fließfähigkeit, Druckfestigkeit, Kosten. Wichtiger erscheint jedoch, dass er den Einsatz der Gelenke positiv bewertet: Trotz einer Senkung des Scheitels um 18 cm (bei einem ursprünglichen Stichmaß von 90 cm) seien an den den Gelenken benachbarten Steinen keinerlei Schäden bemerkt worden. Zudem erlaubten die Gelenke eine schlankere Ausführung des Bogens und damit eine Materialeinsparung. Dies ermögliche leichtere und kostengünstigere Konstruktionen. Auf Grundlage dieser eigenen Untersuchungen verglich er in einer Studie die Kosten von Brücken mit 50 und mit 100 m Spannweite, jeweils als Straßen- bzw. Eisenbahnbrücke, gelenkig bzw. eingespannt, massiv bzw. aus Eisen. Er kommt zu folgendem Ergebnis: *„Die Anwendung der Metallfugen zusammen mit den drei Gelenken am Scheitel und in den Bruchfugen erlaubt die Konstruktion von weitgespannten Mauerwerksbogen weit wirtschaftlicher als mit allen anderen Bauweisen und sogar als bei den Eisenbrücken.“*⁶⁰¹ [Tavernier 1899, S. 134]. Trotz dieser positiven Ergebnisse dauerte es bis zum Jahr 1906, bis wiederum Tavernier letztlich beim Pont Branla nördlich von

que nous présentons a pour but d'établir l'importante supériorité de ce système sur ceux qui ont été en usage jusqu'à ce jour, et de mettre en évidence les ressources qu'il peut procurer à l'art de l'Ingénieur, surtout dans les ponts surbaissés de grande portée.“

⁵⁹⁹ Original: „En résumé, la triple articulation, mise en œuvre dans les conditions ci-dessus définies, réalise, mieux que tout autre système, les qualités essentielles à donner à une voûte en maçonnerie, c'est-à-dire la sécurité de l'exécution et la légèreté de la construction. Ses avantages sont tels, à ce double point de vue, qu'il semble impossible qu'ils restent plus longtemps méconnus.“

⁶⁰⁰ Original: „En résumé, on peut dire que l'emploi de la triple articulation fait disparaître complètement pour les ponts en maçonnerie l'infériorité qui existe dans les ponts non articulés du fait des points d'applications de la courbe de pression aux joints de la clef et de rupture.“

⁶⁰¹ Original: „L'emploi combiné des joints métalliques et de la triple articulation à la clef et aux joints de rupture permet de construire des voûtes en maçonnerie de grande ouverture dans des conditions plus économiques que des voûtes en maçonnerie de tout autre mode de construction et même que des ponts métalliques.“

Lyon⁶⁰² die ersten Gelenke in eine französische gewölbte Brücke einbaut (Abbildung 7.22). Die Brücke wurde damit zu einer Zeit eröffnet, in der in Deutschland der Dreigelenkbogen zur Standardbauweise geworden war.⁶⁰³ Der Pont Branla besteht aus zwei 25 m weiten Werksteinbögen mit eisernen Wälzgelenken im Scheitel und in den Kämpfern [Tavernier 1907, S. 6].

1913 schreibt Paul Séjourné in seiner mehrbändigen Monographie „*Grandes Voûtes*“, dass der Pont Branla jedoch ein Einzelfall blieb. Zu der Ausführung von Dreigelenkbogen kann man dort lesen: „*Ich kenne lediglich: In Frankreich⁶⁰⁴ die beiden 25 m weiten Bögen des Pont Branla.*“⁶⁰⁵ [Séjourné 1913d, S. 278]. Eine Einschränkung führt er jedoch an: Die Federgelenke von Augustin Mesnager, die beginnend mit dem Jahr 1907 ausgeführt wurden, werden von Mesnager selbst als „*semi-articulation*“, also als Halbgelenke bezeichnet [Mesnager 1907, S. 180]. Diese lässt Séjourné in seiner Betrachtung außen vor. Diese Art der Federgelenke wurden in der Folge von Mesnager⁶⁰⁶ und Freyssinet⁶⁰⁷ weiterentwickelt und eingesetzt.

Zusammenfassend kann die gegensätzliche Entwicklung der Gelenke bei gewölbten Brücken in Deutschland und in Frankreich wiederum mit zwei Zitaten aus den „*Grandes Voûtes*“ von Séjourné beschrieben werden: „*Gewölbe mit Gelenken zu versehen, ist eine französische Idee*“⁶⁰⁸ [Séjourné 1913d, S. 26], jedoch „*ist es Deutschland, wo man mit der Anwendung begonnen hat und wo man die meisten Gelenke einbaut.*“⁶⁰⁹ [Séjourné 1913d, S. 278].

7.5 Die Ausführung von Gelenken in Massivbrücken

Um ein Gelenk herzustellen, gab es wie zuvor bereits angedeutet, mehrere verschiedene Möglichkeiten. Nachfolgend sollen die Haupttypen der Gelenke ausführlich besprochen werden. Am Ende eines jeden Unterkapitels werden ausgeführte Beispiele vorgestellt. Dabei wurde bei der Auswahl der vorgestellten Brücken darauf geachtet, dass diese auch heute noch erhalten sind und von der Verfasserin untersucht wurden. Bei mehreren zur Auswahl stehenden Brücken wurden die frühesten Beispiele bevorzugt.

⁶⁰² Der Pont Branla (auch Pont de la Branla oder Pont Vert) befand sich zwischen Neuville-sur-Saône und Genay. Er verband die frühere Insel Branla mit dem Festland. Mit der Erschließung eines Industriegebiets verschwand die Insel, 1970 wurde die Brücke abgebrochen [Les Amis du Vieux Neuville o. J.].

⁶⁰³ Vgl. Kap. 7.3.

⁶⁰⁴ Hier ist lediglich das Gebiet der französischen Republik gemeint, in der damals französischen Kolonie Algerien erwähnt Séjourné drei mit Bleigelenken versehene Brücken in Oued Dar-el-Oued, Oued Amacin und Oued Djemaa.

⁶⁰⁵ Original: „Je connais seulement: En France, les deux anneaux de 25 m du pont Branla.“

⁶⁰⁶ Vgl. Kap. 7.5.8.

⁶⁰⁷ Vgl. Kap. 7.5.9.

⁶⁰⁸ Original: „Articuler les voûtes est une idée française.“

⁶⁰⁹ Original: „C'est en Allemagne qu'on a commencé à articuler les ponts et qu'on en articule le plus.“

Bei der Reihenfolge der vorgestellten Gelenktypen wurde auf eine rein chronologische Ordnung verzichtet – sonst hätten Steingelenke vor den Bleieinlagen behandelt werden müssen usw. Vielmehr legt die Verfasserin Wert auf eine technisch durchgehende Darstellung, die von den „einfachsten“ Formen, also Sollbruchstelle und Gelenkeinlage, die auch beide im ganz engen Sinne des Wortes noch kein Gelenk darstellen, hinführt zu den optimierten Formen. Auf diese Weise lassen sich auch gemeinsame Probleme verschiedener Gelenktypen wie z. B. Gleiten bei Stein- und Wälzgelenken⁶¹⁰ gemeinsam behandeln.

7.5.1 Sollbruchstellen

Die einfachste Art der Gelenkbildung – die im strengen Sinne noch kein Gelenk darstellt – ist die Ausbildung von Sollbruchstellen. Während ein Gelenk im eigentlichen Sinne ein Bauteil ist, das die Rissbildung durch Bewegungsmöglichkeit verhindert bzw. minimiert, verhindert die Sollbruchstelle die Rissbildung nicht, sie definiert lediglich die Stelle, an der der Riss auftauchen soll. Trotzdem ist der Gedankengang der Sollbruchstelle schon recht fortschrittlich, da auch hier davon ausgegangen wird, dass man die Bewegung nicht verhindern, sondern lediglich kontrollieren kann: Die Ausbildung von Rissen wird zwar gebilligt, sie sollen jedoch an eine vorherbestimmte Stelle gezwungen werden.

Sollbruchstellen werden in der Literatur quasi nicht beschrieben, einige wenige Ausnahmen werden hier angeführt: So wird etwa im Handbuch der Baukunde von 1892 nochmals der Gewölbeversuch⁶¹¹ von Feege & Gotthard aus dem Jahr 1879 besprochen: *„Einer annäherungsweise Herstellung wenigstens zweier Scharniere kommt es gleich, wenn man das Gewölbe an den Kämpfern so schwach macht, dass dort die Festigkeit des Materials schon bei gleichmässiger Vertheilung der Pressungen voll in Anspruch genommen wird, während im Scheitel mehr Material vorhanden ist, um der Stützlinie Raum zum Ausschlage bei einseitiger Belastung zu geben.“* [Barkhausen 1892, S. 327]. Allerdings basieren die Ausführungen in der Praxis auf einem anderen Prinzip: Hier wird durch Anordnung von Dilatationsfugen im Überbau davon ausgegangen, dass dann auch der Riss im Bogen an jener Stelle auftritt, wo diese Fuge auf den Bogen trifft.

Ausgeführte Beispiele von Sollbruchstellen

Ein gutes Beispiel hierfür ist die Hackerbrücke⁶¹² in München aus dem Jahre 1891: *„An den in der Zeichnung angegebenen Stellen sind Dilatationsfugen angeordnet, welche durch die Stirnwände hindurch gehen.“* [Büsing 1899, S. 357; Abbildung 7.23]. Diese Fugen sind jeweils in den Drittelpunkten angebracht, sie sind sehr schmal, so dass eher von einer Bauteiltrennung denn von einer Fuge gesprochen werden kann. In der Abbildung 7.24 ist zu sehen, dass in Verlängerung der Fuge ein Riss bzw. die Bauteiltrennung durch die Laibung des Gewölbes geht. Eine Gelenk-Einlage innerhalb der Sollbruchstelle ist weder auf dem Plan noch am Bauwerk erkennbar.

⁶¹⁰ Vgl. Kap. 7.5.6.

⁶¹¹ Vgl. Kap. 4.4.

⁶¹² Beschreibung im Katalog unter BY11.

Ein weiteres Beispiel ist die Rottachbrücke in Kempten-Rothkreuz aus dem Jahr 1908. In den Planunterlagen⁶¹³ kann man deutlich die Fugen über dem Pfeiler erkennen: Diese Fugen gehen – anders als bei der Hackerbrücke – nicht durch den Bogen durch. Hier wurde damit gerechnet, dass im Falle einer Rissbildung dieser unterhalb der Fuge auftauchen würde. Vor Ort konnten aber keine Risse festgestellt werden (Abbildung 7.25), die Spannweite ist mit 11 m allerdings auch eher gering, so dass keine größeren Bewegungen stattgefunden haben dürften.

Eine ähnliche Vorrichtung ist bei der Plauener Friedensbrücke beschrieben: „*In statischer Hinsicht zerfällt der Hauptbogen in einen mittleren, als eingespannter elastischer Bogen zu betrachtenden Teil von 65 m Spannweite und die beiden weit ausladenden Widerlager. (...) Die Kämpferfugen sind durch die Stirnmauern bis zur Fahrbahn fortgesetzt und werden mit einer plastischen Masse ausgefüllt.*“⁶¹⁴ [Fleck 1904, S. 355]. Die Plauener Friedensbrücke wies nach der Fertigstellung große Scheitelsenkungen auf, die über Jahrzehnte hinweg fortschritten. In einem Zeitschriftenartikel von 1948 wurde dieses Problem einschließlich der verschiedenen Sanierungsmaßnahmen diskutiert [Meinel 1948]. Zu den Dilatationsfugen zitiert Meinel den 1938 zu Rate gezogenen Professor Rüh: „*Die bei der Erbauung vorgesehenen Dilatationsfugen erfüllten ihren Zweck nicht.*“ [Meinel 1948, S. 227]. Aus diesem Grunde wurden neue Dilatationsfugen eingeschnitten, allerdings nicht an der ursprünglich vorgesehenen Stelle, sondern in Richtung des Scheitels eingerückt (Abbildung 7.26). Im Bogen selbst war kein Gelenk vorgesehen. Die Friedensbrücke ist bei mehreren Sanierungen und Ertüchtigungen großflächig überarbeitet worden, so dass man am Intrados des Bogens nicht mehr die originale Oberfläche vorliegen hat. Deshalb ist auch keine Aussage zur Trennung im Bogen mehr möglich. Die Verfasserin geht aufgrund der vorliegenden Unterlagen davon aus, dass an der ursprünglichen Stelle der Bogen getrennt war, allerdings ohne Gelenk. An der neuen Stelle weist der Bogen vermutlich keinerlei Trennung auf – und somit wurde eine nachträgliche Sollbruchstelle ausgeführt.

7.5.2 Gelenkeinlagen

In der Anfangszeit der Ausbildung von Bewegungsmöglichkeiten in Massivbrücken wurden zwei Arten besonders häufig ausgeführt: Stein- bzw. in der Folge Betongelenke⁶¹⁵ sowie Gelenkeinlagen. Für die Gelenkeinlagen gab es verschiedene Materialien: Bekannt ist der Einsatz von Asphaltplatten sowie Mörtleinlagen, weitaus vorherrschend war jedoch der Einsatz von Bleiplatten. Da alle vom Gedankengang her vergleichbar sind, werden die verschiedenen Einlagen innerhalb eines Kapitels abgehandelt.

Das Prinzip besteht darin, im Scheitel und in den Kämpfern eine Verengung der Fuge mittels der Einlage zu erstellen. Durch diese Verengung wird die Stützlinie von den Rändern des Bogens wegbewegt. Während es sich bei einem „wirklichen“ Gelenk um eine

⁶¹³ Diese wurden vom Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten zur Nutzung, jedoch nicht zur Veröffentlichung, zur Verfügung gestellt.

⁶¹⁴ An der heutigen Brücke geht die ursprüngliche Fuge nicht komplett bis oben durch (Abbildung 7.26), da die Brücke aber mehrfach überarbeitet wurde, kann hieraus nicht gefolgert werden, dass dies bereits bauzeitlich so war. Im Plan von 1948 ist die alte Fuge in der heutigen Form als nicht durchgehend eingezeichnet.

⁶¹⁵ Vgl. Kap. 7.5.3.

annähernd linienförmige Berührungsfläche handelt, ist bei der Gelenkeinlage die Fläche größer. Auch wenn an der Minimierung der Gelenkeinlagenbreite gearbeitet wurde: Ein Gelenk im ganz engen Sinne der Definition stellt die Gelenkeinlage noch nicht dar, was sich bauzeitlich sehr oft in der Bezeichnung „gelenkartige Einlagen“ widerspiegelte.

Einlagen aus Asphaltplatten

Die erste Betonbrücke, die nachgewiesenermaßen mit gelenkartigen Einlagen versehen wurde, war im Jahre 1887 die Brücke über die Westernach in Erbach an der Donau [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1893, S. 103–108; Abbildung 6.7].⁶¹⁶ Da der Untergrund etwas nachgiebig erschien und die Spannweite von 32 m bei einem Pfeilmaß von nur 4 m durchaus Probleme erwarten ließ, veranlasste der zuständige Straßenbauinspektor Koch das Einlegen von Asphaltplatten⁶¹⁷ in Scheitel und Kämpferfugen, um Risse zu vermeiden [Büsing 1892, S. 259–260]. Die Abbildung 7.27 zeigt die Brücke im Bauzustand, sowohl in den Haupt- als auch in den Seitenöffnungen sind die dort vorhandenen Fugen zu sehen.

Im Detailausschnitt aus einem Plan aus dem Januar 1888 ist der Aufbau des Gelenks zu erkennen (Abbildung 7.28). Die Asphaltplatten wurden über die komplette Fugenbreite eingelegt, die Gelenkwirkung wurde dadurch erzielt, dass die mittlere der fünf eingelegten Asphaltplatten eine keilförmige⁶¹⁸ Faltung erhielt, die durch Zusammendrücken die Bewegungen aufnahm. Diese Faltung verbreiterte sich im Scheitel an der Oberseite, in den Kämpfern zum Intrados hin – und damit in erwarteter Richtung der Drehungen. Das Resümee zur Einlage war positiv: „Die Asphaltplatten und Einlagen in den Kämpfer- und Scheitelfugen haben (...) ihren Zweck, die Bewegungen des Gewölbes ohne schädliche Materialspannungen zu ermöglichen, vollkommen erfüllt.“ [StALB, Sign. E 166 Bü 4313]. Die Verdrückung war über die Fuge gesehen etwa gleichmäßig, was den Schluss zuließ, dass die Spannung auch gleichmäßig verteilt war und damit die Stützlinie in etwa durch die Mitte des Fugenquerschnitts ging [StALB, Sign. E 166 Bü 4313].

Die Ausbildung von Gelenkeinlagen mittels Asphaltplatten wie am Beispiel der Erbacher Brücke beschrieben bildete die Ausnahme.⁶¹⁹ Die Asphaltplatten waren verhältnismäßig

⁶¹⁶ Vgl. hierzu auch Kap. 6.2.3. Die von Julius Schlichting erwähnte, 1884 gebaute Betonbrücke über den Eschergraben [Schlichting 1888, S. 336], ebenso in Erbach, war wohl mit ähnlichen Gelenken ausgestattet, vertiefende Unterlagen sind aber auch in den einschlägigen Archiven nicht vorhanden. Der Eschergraben heißt heute Erlenbach [StALB, Sign. E 166 Bü 4312]. Die Brücke ist nicht mehr vorhanden (eigene Vor-Ort-Begehung).

⁶¹⁷ Warum die Wahl bei dieser Brücke auf Asphalt- und nicht auf Bleiplatten fiel, die ja zu dieser Zeit bei der Enzbrücke in Höfen bereits ausgeführt waren, konnte nicht mehr festgestellt werden. Wenngleich die Publikation von Karl von Leibbrand zu seinen „Steinbrücken mit gelenkartigen Einlagen“ [Leibbrand 1888] erst 1888 erschien, so muss doch aufgrund der regionalen Zusammenhänge davon ausgegangen werden, dass Koch die Arbeit Leibbrands bekannt war. Eventuell waren Kostenfragen ausschlaggebend oder vielleicht auch nur der Wunsch nach Verwirklichung seiner eigenen Idee.

⁶¹⁸ Erweiterung von 15 auf 23 mm.

⁶¹⁹ Bekannt ist die Verwendung von Asphaltplatten auch beim Probegewölbe aus Stampfbeton bei den Versuchen des Gewölbe-Ausschusses des Österreichischen Ingenieur- und Architektenvereins (vgl. Kap. 4.4). Dort wurden auf Veranlassung der ausführenden Firma Pittel & Brausewetter an den Kämpfern Asphaltplatten eingelegt, obwohl der Gewölbe-Ausschuss damit nicht einverstanden war. Auf diese Weise ergab sich bei den

leicht zusammendrückbar [Büsing 1905, S. 461], des Weiteren konnten nur sehr kleine Bewegungen aufgenommen werden.⁶²⁰ Zudem war der Zustand des Gewölbes in statischer Hinsicht schwierig zu beurteilen, da es sich weder um ein eingespanntes noch um ein gelenkig gelagertes System handelte [Melan 1911, S. 201]. Aus diesen Gründen konnte sich diese Ausführung nicht durchsetzen.

Ausgeführte Beispiele mit Asphalteinlagen: Keine erhaltenen Beispiele bekannt. Als vergleichbar ist jedoch die Ausführung am Nebengewölbe der Dovebrücke⁶²¹ in Berlin, 1911, zu werten. Hier wurden Pappkeile eingelegt (Abbildung 7.29). In einem Artikel über die Dovebrücke wurde beschrieben, dass die Nebengewölbe durch „Einlegen von Pappstreifen mit sogenannten unvollkommenen Gelenken“ versehen worden seien [Zangemeister 1912, S. 207]. Die Stirnverkleidungen wurden allerdings – insbesondere im Scheitel – so erstellt, dass man die Gelenke an der Brücke nicht sehen kann, lediglich an den Dilatationsfugen oberhalb der Gelenke sind die Bewegungsmöglichkeiten zu erahnen (Abbildung 7.30).

Einlagen mit Bleiplatten

Dem Nachteil der leichten Zusammendrückbarkeit und damit der Außerkraftsetzung des Gelenkes wurde mit der Ausbildung von Einlagen aus Blei begegnet. Der große Vorteil von Blei ist sein Materialverhalten. Wie schon weiter oben beschrieben,⁶²² bleibt Blei bis zum Erreichen seiner Druckfestigkeit stabil. Statt allerdings bei höherer Belastung zu versagen, beginnt das Blei in diesem Falle, langsam seitlich auszuweichen. Dadurch vergrößert sich die Druckfläche bis wiederum die Festigkeit des Bleis bei vergrößerter Übertragungsfläche zur Lastaufnahme ausreichte. Auf diese Weise war ein Versagen der Bleiplatten quasi ausgeschlossen. Die ersten ausgeführten Brücken verfügten noch über sehr breite Einlagen – beim Bau der Enz-Brücke in Höfen hatten diese Bleiplatten im Scheitel 35 cm bei einer Scheitelstärke von 1,00 m, im Kämpfer waren sie 50 cm breit bei einer Gewölbstärke von 1,50 m [Leibbrand 1888, S. 243]. Dies entspricht ziemlich genau dem mittleren Drittel des Querschnitts, von einer Berührungs-„Linie“ konnte hier sicherlich nicht die Rede sein. Deshalb gingen schon früh die Bemühungen in die Richtung, mit dem Ziel der besseren Gelenkwirkung die Bleiplattenbreite zu minimieren: „Die Bleieinlagen, welche bei den ersten Ausführungen noch eine Breite von 1/3 der Fugenbreite erhielten, sind später wesentlich kleiner gehalten worden und haben beispielsweise bei der Forbachbrücke⁶²³ in Baiersbronn nur noch 1/6 der Fugenbreite betragen“ [Leibbrand o.].

dortigen Proben die schwierige Problematik, wie man das Gewölbe beurteilen solle: als Zweigelenkbogen oder als eingespannten Bogen. Joseph Melan, der die statische Beurteilung mit betreute, wertete dies als eine Unbestimmtheit, die sich in den Berechnungen kaum richtig berücksichtigen lasse. Der wirkliche Zustand des Gewölbes sei zwischen den beiden Zuständen anzusiedeln. Es sei jedoch nicht zu bestimmen, in welchem Grad sich der Bogen mit den Asphaltplatten dem einen oder anderen Zustand nähere [Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein 1895, S. 65].

⁶²⁰ Vgl. „Bei sehr gutem Baugrunde (Fels, strengem Lehm, festgelagertem grobem Kies) kann man dem Bauwerke dadurch eine gewisse Beweglichkeit geben, daß man an der inneren und äußeren Leibung im Scheitel und an den Kämpfern keilförmige Asphaltfilzstreifen einlegt.“ [Köhler 1908, S. 303].

⁶²¹ Beschreibung im Katalog unter D1.

⁶²² Vgl. Kap. 7.2.

⁶²³ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü4.

(1894), S. 12]. Die untere Grenze der Breite der Bleieinlage war wiederum zum einen abhängig von der Druckfestigkeit des Bleis, zum anderen aber auch von der Druckfestigkeit des anstehenden Gewölbematerials [Leibbrand o. J. (1894), S. 3].

Aus diesem Grund veranlasste Karl von Leibbrand, der die Bleieinlagen erstmals verwendete und auch als einer ihrer größten Fürsprecher gelten muss, bereits im Rahmen seiner ersten Brückenbauten mit gelenkartigen Einlagen⁶²⁴ ausführliche Materialversuche an der Materialprüfanstalt in Stuttgart. Der dort zuständige Leiter Carl von Bach schreibt bereits 1885 und damit in demselben Jahr der Erbauung der Enzbrücke in Höfen: „*Wie gross cd [die Bleiplattenbreite, Anm. d. Verf.] mindestens sein muss, hängt ab von der zulässigen Druckbelastung des Bleies einerseits und des Steinmaterials andererseits. Wählt man genügend festen Stein, so wird jedenfalls die Widerstandsfähigkeit des Bleies gegen Druckbeanspruchung massgebend sein.*“ [Bach 1885, S. 629]. Ausführliche Materialtests waren zu diesem Zeitpunkt schon völlig üblich; Leibbrand schreibt 1894, es sei nie unterlassen worden, die zu einem Brückenbau bestimmten Materialien auf ihre Druckfestigkeit hin zu untersuchen [Leibbrand o. J. (1894), S. 4]. Offen blieben die bauartspezifischen Fragen zum Verhalten des Bleis sowie zum Verhalten des Gewölbematerials bei streifenweiser Belastung durch die Bleiplatten.

Druckversuche an teilweise belasteten Steinproben führte bereits Johann Bauschinger im Jahre 1875 im Labor der polytechnischen Schule in München aus [publiziert 1876: Bauschinger 1876, S. 13–17], damals allerdings noch nicht in direktem Zusammenhang mit der Ausführung von Gelenkeinlagen. Probewürfel aus verschiedenen Steinmaterialien wurden auf mehrere verschiedene Arten Druckversuchen ausgesetzt: Neben den üblichen vollflächigen Druckversuchen an verschieden geformten Proben erfolgte zudem die teilweise Belastung mit quadratischen Stahlstempeln verschiedener Größen, welche jeweils ein- oder beidseitig am Probewürfel angebracht wurden. Auch eine streifenförmige Belastung wurde bereits untersucht, allerdings mit einer Streifenbreite von nur 5 mm. Des Weiteren wurden die Probewürfel anhand der beschriebenen Stempel auch exzentrisch belastet. Sämtliche Versuche wurden genau dokumentiert. Bauschinger fand dabei heraus, dass das Versagen in allen Fällen mit seitlichem Absprengen durch den in den Probekörper gedrängten keilförmigen Bruchkörper erfolgte [Bauschinger 1876, S. 13–17].

Léon Charles Durand-Claye führte 1885–1886 zahlreiche Versuche an Steinwürfeln durch, die lediglich auf einer quadratischen Teilfläche belastet wurden [Flamant 1887]. Dabei stellte er fest, dass diese Steine weit über ihre Druckfestigkeit hinaus belastet werden konnten, wenn diese Belastung eben nicht über die volle Fläche aufgebracht wurde. Direkt übernehmen konnte man diese Versuche nicht für die Ausführung von Bleiplatten, da hier die Belastung ja streifenförmig und nicht auf einer quadratischen Teilfläche aufgebracht wurde. Aufbauend auf die Arbeiten von Bauschinger und Durand-Claye beschreibt Bach in seinem Buch „*Elastizität und Festigkeit*“ [Bach 1889–1890, S. 49] eigene Versuche mit streifenförmiger Belastung: Dabei stellte er fest, dass auch hier die Verringerung der Streifenbreite eine deutliche Erhöhung der Bruchlast des Steinmaterials bezogen auf die

⁶²⁴ Vgl. Kap. 7.2.

Streifenfläche nach sich führte (Abbildung 7.31).⁶²⁵ Die Frage, ob es zulässig sei, das Steinmaterial des Gewölbes in solcher Weise zu beanspruchen wurde von Leibbrand klar beantwortet: „*Diese Frage ist unbedingt zu bejahen.*“ [Leibbrand 1888, S. 239].

Die Versuche zum Materialverhalten von Blei begannen, wie bereits erwähnt, mit dem Brückenbau in Höfen. Dass diese Materialversuche explizit für Brückenkonstruktionen durchgeführt wurden, kann man bereits dem einleitenden Satz entnehmen [Bach 1885, S. 259]. Die Versuche fanden an Würfeln und Scheiben aus Guss-, Weichwalz- und Hartblei statt. Dabei wurden Festigkeiten jeweils für Dauerbeanspruchungen und Grenzen für das seitliche Ausfließen angegeben. Da die Festigkeit von Würfeln aber wiederum nicht direkt anwendbar war auf die streifenförmigen Bleieinlagen wurden auch hier die Versuche fortgeführt. 1888 folgten Versuche an Bleiplatten. Hierbei stellte man fest, dass eine geringe Zugabe an Antimon von etwa 5 % die Druckfestigkeit des Weichwalzbleis deutlich erhöhte, ohne dessen gewollte Fähigkeit zum Ausfließen unter höherem Druck wesentlich zu beeinträchtigen [Leibbrand o. J. (1894), S. 2]. Die Wahl fiel deshalb in der Folge für Brücken bis 40 m Spannweite zumeist auf das Weichwalzblei, „*bei grösseren Spannweiten werden dagegen härtere Bleisorten in Verwendung zu nehmen sein.*“ [Leibbrand 1888, S. 258]. Hartblei selbst wurde kaum verwendet, da die Druckfestigkeit des Materials aufgrund der geringeren Druckfestigkeit der Gewölbematerialien sowieso nicht hätte ausgenutzt werden können, des Weiteren hatte es den Nachteil des viel zu spät einsetzenden Fließens bei exzentrischer Belastung [Kollmar 1919, S. 17; S. 24].

Die Bleieinlagen wurden in der Folge vielfach ausgeführt. Ein großer Vorteil waren ihre geringen Kosten bei ausreichender Funktionalität. Probleme bei der Ausführung von Bleieinlagen waren anfangs insbesondere das Misstrauen gegen die Witterungsbeständigkeit von Blei, weswegen die sehr frühen Bleieinlagen allesamt nachträglich mit dünnflüssigem Zementmörtel vergossen wurden, also ausschließlich als temporäre Gelenke gebaut wurden. Erst mit der Neckarbrücke in Fischingen 1895 wurden Bleigelenke auch permanent gebaut [Kollmar 1919, S. 30]. Die Witterungsbeständigkeit und auch die Dauerhaftigkeit gegen die Einflüsse des Betons waren ausreichend.

Bautechnische Probleme beinhalteten hauptsächlich das Verrutschen der Bleiplatten während des Brückenbaus. Hierzu wurden anfangs Stifte⁶²⁶ am unteren Gelenkblock eingebracht [Leibbrand 1888, S. 243], worauf die Bleiplatte dann ruhte, während der zweite Gelenkblock eingebracht wurde. Des Weiteren musste darauf geachtet werden, dass die Bleiplatte gut an den Bogenflächen auflag, um eine gleichmäßige Lasteinleitung zu gewährleisten. In der Funktion war das Bleigelenk eingeschränkt, da es bei größeren Bewegungen zum Verkanten der Bogenschenkel in den Gelenkfugen kommen konnte. Bei der Verwendung von Beton wurden alle drei genannten Probleme – Verrutschen, vollflächiges Anliegen sowie Verkanten – in einem gelöst, indem in die Fugen Holzkeile eingebracht wurden, mit denen zum einen die Bleieinlagen fixiert wurden. Zum anderen

⁶²⁵ Bruchlast bei vollflächiger Belastung 653 at (= Atmosphären; nicht mehr gebräuchliche Einheit für die Druckspannung; entspricht 1 kp/cm² und damit 9,80665 N/cm², also in etwa 1 kg/cm² = 0,1 N/mm²), bei streifenförmiger Belastung mit einer Breite von 0,5 cm betrug die Bruchlast 2050 at.

⁶²⁶ [Mörsch 1968, S. 208] gibt Holzdübel als Alternative an.

konnte dann der Beton direkt gegen die Bleieinlage gestampft und damit ein vollflächiges Anliegen garantiert werden.⁶²⁷ Weiterhin wurden dadurch die Fugen derart aufgeweitet, dass ein Verkanten nicht mehr möglich war.⁶²⁸ Erstmals wurde dies bei der Donaubrücke in Ehingen/Berg im Jahr 1898 ausgeführt,⁶²⁹ diese ist jedoch nicht erhalten. Die Abbildung 7.32 zeigt das Gelenk des Strümpfelbachviadukts von 1909, wo die Aufweitung der Fuge deutlich zu sehen ist. Ebenso sind die dünnen Bleche zum leichteren Entfernen der Holzkeile nach wie vor sichtbar.

Ein weiteres Problem insbesondere beim Verkleinern der Plattenbreite bei permanenten Bleieinlagen war die Gefahr des Abgleitens im Scheitel, zumeist ausgelöst durch einseitige Belastung. Weitere Ausführungen zu diesem Thema sind dem Kapitel 7.5.6 zu entnehmen.

Ausgeführte Beispiele von Gelenkeinlagen mit Blei

In der Regel wurden Bleigelenke nach dem Ausschalen mit Mörtel vergossen. Da sie aufgrund der Breite der Bleieinlage bereits als „unvollkommen“ galten, wurde die Funktion damit auch zeitlich beschränkt. Zudem meinte man, das Blei durch den Verguss vor Angriffen durch die Witterung zu schützen.⁶³⁰ Zu den frühen, noch erhaltenen Betonbrücken mit Bleieinlagen zählt die Schmiechbrücke in Ehingen von 1895.⁶³¹ Bei dieser Brücke wurden die Gelenke erst fünf Jahre nach Fertigstellung vermörtelt, um auch etwaige Setzungen auszugleichen [StASIG, Sign. Wü 65/9 T 2–4 Nr. 2072]. Bis heute kann man die Bleieinlage in der Kämpferfuge gut erkennen (Abbildung 7.33). Die ebenfalls in Ehingen befindliche Brücke am Bahnhof aus dem Jahre 1891, eine der ersten

⁶²⁷ Das direkte Anstampfen des Betons barg im Vergleich zum Vorfertigen der Gelenkquader jedoch auch gewisse Probleme: Bei der Vorfertigung weisen die Quader bis zum Versetzen bereits eine entsprechende Festigkeit auf. Beim direkten Anstampfen ergaben sich zum einen längere Wartezeiten bis das Material die zum Ausrüsten notwendige Festigkeit erlangt hatte. Zum anderen erwiesen sich Verdrückungen oder Setzungen im Lehrgerüst als problematischer, welche den frischen Beton zu früh unter Spannung gesetzt hätten [N. N. 1901a, S. 455].

⁶²⁸ Für die Ausbildungen von Steinbrücken mit Gelenkeinlagen beschrieb Leibbrand die Vorkehrungen wie folgt: „die Bleieinlage wurde mit Bleidollen auf dem unteren Quader befestigt und mit Holzhämmern möglichst fest angetrieben, ehe der nächste Quader angelegt wurde. Die Fugenfläche neben der Bleieinlage soll sich nach aussen erweitern, damit bei der Bewegung des Gewölbes die Fuge offen bleibt. (...) Die Bleifuge wurde während des Wölbens durch weiche Holzkeile in der richtigen Lage erhalten.“ [Leibbrand o. J. (1894), S. 6].

⁶²⁹ Braun schreibt hierzu: „Die Bleiplatten sind hier nicht, wie es bisher üblich war, zwischen zuvor fertiggestellte und dann auf den Lehrbögen versetzte Stein- oder Betonquader gebracht worden, weil es hierbei sehr schwierig ist, die Lagerflächen der Bleiplatten mit den anschliessenden Quadern voll in Berührung zu bringen. Die Gelenkquader sind hier vielmehr auf den Lehrbögen selbst als Gewölbschluss betoniert und zugleich die Bleiplatten in der Mitte der Gewölbstärke mit dem Einbringen des Betons derartig eingelegt worden, dass die Gewölbefugen, oberhalb und unterhalb dieser Bleiplatten keilartig gegen die Mitte etwas zulaufend, frei blieben. (...) Damit war mit völliger Sicherheit ein vollständiges Anschliessen der Bleiplattenflächen an den Beton erreicht. Die Ausführung erfolgte in der Weise, dass in den Schalungen unmittelbar unter den Bleifugen schmale durchgehende Öffnungen ausgespart wurden, in denen man keilartige Holzschauflern, in das Gewölbe hereinragend, an der Schalung befestigte. Die breiten Schauflerflächen erhielten Blechdeckung um das spätere Herausziehen zu erleichtern. Auf diesen Schauflern wurden die Bleiplatten aufgestellt und mit dem Einbetonieren gleichgestaltete Schauflern von oben her auf die Bleiplatten gestellt. Nach 24 Stunden konnten die Schauflern und die Blechstücke entfernt werden.“ [Braun 1901, S. 522–523]. Vgl. auch [N. N. 1901a, S. 455].

⁶³⁰ Hierzu z. B. „Man erreicht hierdurch zugleich eine weitere Gewähr für die Unveränderlichkeit der Bleieinlagen nach Vollendung der Brücken.“ [Leibbrand 1888, S. 242].

⁶³¹ Vgl. Kap. 7.3.

Betonbrücken mit Bleigelenken überhaupt, wurde 1994 gesprengt, um einem breiteren Neubau Platz zu machen [Freudenreich 2003, S. 173]. Das älteste erhaltene permanente Bleigelenk ist bei der Hammerkanalbrücke in Esslingen zu finden. Diese wird in Kap. 7.7 ausführlich behandelt (Abbildungen 7.80ff.). Ein gut sichtbares permanentes Bleigelenk zeigt die Eisenbahnbrücke über die Alz in Trostberg von 1910 (Abbildung 7.34).⁶³²

Eine sehr große Spannweite⁶³³ bei gleichzeitigem Einsatz von Bleigelenken weist die Eisenbahnbrücke über die Alz bei Garching⁶³⁴ auf (Abbildung 7.35 und Abbildung 5.82). Die im Zuge der Hauptbahnlinie Mühldorf–Freilassing zwischen August 1907 und Juli 1908 erbaute Brücke verfügt über einen Hauptbogen mit rund 45 m Lichtweite sowie zwei Nebenbogen mit je 34 m [Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. (1925), S. VIII; Abbildung 7.36]. Während die ausführende Firma Sager & Woerner diesbezüglich lediglich die Lichtweiten angab, sind die Stützweiten den Bauplänen zu entnehmen: 38,55 m bzw. rund 29 m [StAM, Sign. DB 1419]. Verantwortlicher Ingenieur war Ferdinand Beutel.⁶³⁵

Die Architektur dieser Brücke steht in einer Entwicklungslinie, die mit den Illerbrücken in Kempten, 1903–1906,⁶³⁶ ihren Anfang nimmt.⁶³⁷ Dort wurde der Hohlraum über den Pfeilern (Abbildung 8.34) noch verdeckt, die Zwickel jedoch mit der horizontalen Gliederung ausgeführt. Die Illerbrücken in Kempten wurden wiederum von der Königlichen Bayerischen Staatseisenbahn-Verwaltung konzipiert, namentlich durch Ferdinand Beutel [Beutel 1903; 1904]. Dieser war ebenso beteiligt an der Planung der Münchner Ringbahnbrücke über die Isar in Unterföhring zwischen Schwabing und dem Ostbahnhof [Bayerischer Architekten- und Ingenieur-Verein 1912, S. 540; Abbildung 7.37].⁶³⁸ Diese Brücke mit einer Lichtweite der Hauptbogen von rund 30 m wurde in den Jahren 1907 bis 1908, also in etwa zeitgleich mit der Garchinger Brücke, erbaut. Die ausführenden Firmen waren Hummel und Kunz, wobei letztere beim Bau der Kemptener Brücken ebenfalls beteiligt war. Die Garchinger wie auch die Unterföhringer Brücke zeigen die Augen über den Pfeilern offen. Ein weiteres Beispiel, das diese Ausgestaltung aufweist, ist die etwas später erbaute Pegnitzbrücke in Nürnberg, zwischen Schniegling und Muggenhof (1909–1910; Abbildung 7.38).⁶³⁹ Die dortige Brücke wurde von Dyckerhoff & Widmann mit Lichtweiten von 32 und 30,5 m erbaut [BWA, Sign. BWA F100, Nr. 664]. Die technische Verantwortung oblag der Königlichen Eisenbahndirektion Nürnberg [Stegmann 2014, WVZ299]. Auch diese Brücke weist die ovalen Augen und die horizontale

⁶³² Beschreibung im Katalog unter BY24.

⁶³³ Séjourné bezeichnet sie als die größten Gewölbe mit Bleieinlagen [Séjourné 1913d, S. 97].

⁶³⁴ Vgl. [Veihelmann 2015b].

⁶³⁵ Unterschrift auf den Plänen vorhanden [StAM, Sign. DB 1419].

⁶³⁶ Abbildung 8.34, Abbildung 6.24b, Abbildung 7.17, Abbildung 8.33 usw.

⁶³⁷ Als Vorreiter kann vielleicht noch der Chemnitztalviadukt in Chemnitz gelten, der zwar über die Gliederung der Zwickel mit horizontalen Linien, nicht jedoch über den Hohlraum über dem Pfeiler verfügt (Abbildung 7.43; Der Plan des Chemnitztalviaduktes ist auf <http://www.sachsenschiene.net/bahn/kun/kun0041.htm> zu finden, zuletzt geprüft am 15.05.2015).

⁶³⁸ Die Brücke besteht nicht mehr.

⁶³⁹ Vgl. Kap. 8.3. Beschreibung im Katalog unter BY21.

Gliederung auf. Die Gestaltung hatte also auch außerhalb Beutels Wirkungskreises Einfluss.

Mörteleinlagen:

Eines der Hauptprobleme bei der Verwendung von Blei war das Anliegen der Einlage am Gewölbebeton oder -mauerwerk. Um dieses mit Sicherheit zu erreichen, gab es Vorschläge, die Einlage aus Mörtel auszuführen (Abbildung 7.39). Bereits Brosselin hatte für die Brücke von Tolbiac eine solche Mörteleinlage vorgeschlagen, allerdings hat er diesen Vorschlag vermutlich nie ausgeführt.⁶⁴⁰ Beim Bau der Rechtensteiner Donaubrücke gab es das Problem mit dem Anliegen der Bleiplatten erneut. Der zuständige Bauinspektor Braun beschreibt ausführlich: *„Es hat sich auch bei diesen Steinbögen, wie bei anderen von mir mit Bleigelenken erbauten, ergeben, dass die Bleiplatten selbst nach dem Aufbringen der vollen Bogenbelastung, nicht überall an den sie pressenden Quadern anliegen, auch war die Grösse der Scheitelsenkungen für die beiden Gewölbstirnen desselben Bogens stets verschieden. Der Unterschied betrug bis zu 15 mm.“* [Braun 1893, S. 443]. Diese Probleme der ungleichmäßigen Scheitelsenkung führte er ebenso auf das mangelhafte Anliegen der Bleiplatten zurück. Ein vollflächiges Anliegen sei nur dann zu bewerkstelligen, wenn die Bleiplatten auf ganzer Fläche mindestens mit der maximalen Druckspannung belastet werden [Braun 1893, S. 443]. Damit müsse man die Gelenke aber entsprechend verkleinern. Im beschriebenen Falle hätten die Gelenkeinlagen eine Breite von 10 und 9 cm gehabt. Braun bezeichnet dies als *„etwas unheimlich schmale Gelenke!“* [Braun 1893, S. 443]. Um bei voller Funktion trotzdem breitere Einlagen machen zu können, schlug er Mörteleinlagen vor: *„Ich möchte in Anregung bringen, statt der Bleiplatten Cementmörtel, etwa in der Mischung 1:1, in solcher Breite je in eine Kämpfer- und Scheitelfuge und in die Mitte der Gewölbstärke einzubringen, dass die Beanspruchung beim belasteten Gewölbe 70 bis 100 kg/qcm beträgt. (...) Eine solche Mörteleinlage mit Sicherheit überall satt anliegend zwischen die Gelenkquader zu bringen, dürfte keine Schwierigkeit haben. Bei der Ausschalung wäre die gelenkartige Wirkung dieser Einlagen vollständig gewahrt, die Drucklinie ebenso festgelegt wie bei den Bleiplatten, die Quaderbeanspruchung eine gleichmässiger und ungleiche Scheitelsenkung wohl ganz ausgeschlossen.“* [Braun 1893, S. 443–444]. Auch die Mörteleinlagen seien im Abstand zu versetzen, damit sie nachträglich mit Mörtel ausgegossen werden können. Da jedoch die spätere Auffüllung weniger beansprucht werde als die Mörteleinlage, sei die Gelenkwirkung auch bei späteren Temperaturschwankungen gegeben, besser sogar noch als bei den Bleieinlagen, da bei diesen vergleichsweise mehr Last über die Vermörtelungen abgetragen werde als bei den Mörteleinlagen [Braun 1893, S. 444].

Ausgeführte Beispiele mit Mörteleinlagen: Keine erhaltenen Beispiele bekannt.

7.5.3 Stein- und Betongelenke

Stein- und Betongelenke gleichen sich im Prinzip: Beide wurden aus je zwei Blöcken hergestellt, die an der Kontaktfläche Rundungen in verschiedenen Radien aufwiesen.

⁶⁴⁰ Vgl. Kap. 7.1 und 7.4.

Dabei wurde im Allgemeinen ein Block konvex, der andere konkav gerundet. Auf diese Weise konnte der Bogenschenkel um den Auflagerpunkt rotieren. Es handelt sich also um ein „Wälzelenk“, wenngleich dieser Begriff im Massivbrückenbau den eisernen bzw. stählernen Wälzelenken vorbehalten ist.⁶⁴¹ Ein Hauptproblem der Stein- und Betongelenke war der Umgang mit dem Querzug im Gelenkblock. Da es hierzu unzählige Quellen gibt und da dies auch für mehrere Gelenktypen relevant ist, wurde in vorliegender Arbeit ein eigenes Kapitel eingefügt, das diesen Umstand ausführlich beleuchtet.⁶⁴²

Steingelenke

Die erste Brücke mit Steingelenken war die Gottleubabrücke in Langenhennersdorf.⁶⁴³ Die Gelenksteine in den Kämpfern dieser Brücke wiesen Radien von 0,977 m und 1,105 m bei einer Gewölbstärke von 0,60 m auf [Köpcke 1888, S. 374]. Dies entspricht einem Verhältnis von $r_1 = 1,63 d$ sowie $r_2 = 1,84 d$. Diese Radien waren noch recht klein, für gewöhnlich empfiehlt Melan für die Wölbradien: „Den Halbmesser des konvexen Gelenksteines macht man, wenn d die Gewölbstärke, $r_1 = 1,5 d$ bis $3 d$, jenen des konkaven Steines $r_2 = 2 d$ bis $4 d$. Die Höhe der Gelenkquader soll etwa $= d$ sein.“ [Melan 1911, S. 208]. Wurden bei der Gottleubabrücke in Langenhennersdorf die Gelenksteine noch aus Sandstein gefertigt, so setzten sich in der Folge aufgrund höherer Festigkeit Steingelenke aus Granit durch.

Ausführliche Versuche zum Verhalten von Steingelenken aus Granit bzw. aus Sandstein führte Carl von Bach in der Materialprüfanstalt in Stuttgart durch [Bach 1903c; Bach 1904]. Dabei fand er durch vorheriges Berußen des Probekörpers heraus, dass die Berührungsfläche zwischen den beiden Gelenkteilen keine zusammenhängende Rechteckfläche war, wie es bei der Berechnung gemeinhin angenommen wurde, sondern dass sich bei der Berührung sogenannte Inselflächen bildeten. Erst bei Erhöhung der Druckkraft verschmolzen diese Einzelflächen zu größeren, zusammenhängenderen Flächen (Abbildung 7.40). In Teilfigur A11 in der genannten Abbildung sind die Risse in der Gelenkfläche zu sehen, einer in der Mitte und zwei außen.

Aufgrund dieser unzusammenhängenden Berührungsflächen konnte es zu Spannungsspitzen kommen. Einer sorgfältigen Ausführung der Wölbflächen musste deshalb erhöhte Aufmerksamkeit zukommen [z. B. Melan 1911, S. 208]. Die Berührungsflächen der Steingelenke wurden poliert [Leibbrand 1898, S. 188]. Ein genaues Versetzen der Steinblöcke, damit die Berührung in der Bogenachse stattfindet ebenso wie das perfekte Anliegen beider Blöcke waren wesentlich. Um dies sicher zu gewährleisten wurden kleine Bleistreifen eingelegt: Melan beschrieb, dass die Gelenksteine sorgfältig in der gegenseitigen Lage mit Berührung in der Bogenachse zu versetzen seien. Lediglich bei glatt bearbeiteten Quadern könne man eine direkte Berührung der Blöcke zulassen, ansonsten empfehle es sich, „zum Ausgleich kleiner Unebenheiten dünne, etwa 2 mm dicke Weichbleistreifen einzulegen, die man in einigen Fällen auch noch zwischen 0,1 mm dicke

⁶⁴¹ Vgl. Kap. 7.5.5.

⁶⁴² Vgl. Kap. 7.5.4.

⁶⁴³ Vgl. Kap. 7.2.

Messing- oder Kupferbleche gepackt hat, um das Einpressen des Bleies in die Steinporen zu verhüten.“ [Melan 1911, S. 207]. Die eingelegten Bleistreifen dienten lediglich zur Gewährleistung einer gleichmäßigen Lastverteilung, eine Gelenkwirkung wie bei den in Kap. 7.5.2 beschriebenen Bleieinlagen ist bei der sehr geringen Stärke von 2 mm keinesfalls gegeben.⁶⁴⁴

Steingelenke funktionieren durch Abrollen der beiden Gelenklöcke. Dadurch verschiebt sich allerdings die Berührungslinie minimal im Bereich der Gelenkfuge.⁶⁴⁵ Während das Handbuch für Eisenbetonbau aufgrund dessen Steingelenke lediglich für mäßige Spannweiten von 30 bis 40 m empfiehlt [Emperger 1911, S. 383], betrachtet Melan die Verschiebung in Abhängigkeit von der Scheitelsenkung und bewertet diese im Ergebnis als vernachlässigbar: Die eintretende Verschiebung der Berührungsstelle der Gelenksteine sei so geringfügig, dass ein fixer Gelenkpunkt angenommen werden könne [Melan 1911, S. 207].

Weitere Überlegungen fanden statt zu der Ausbildung der Gelenksteine, insbesondere auch zu den Wölbradien der Gelenkflächen. In den bereits oben beschriebenen Versuchen fand von Bach dahingehend heraus, dass der Radius der Gelenksteine weit weniger relevant war als vorher erwartet [Bach 1903c, S. 81]. Erstmals wurden 1896 bei der Eyachbrücke in Imnau Granitgelenke eingebaut (Abbildung 7.41). Diese Gelenke verfügten jedoch noch über eine besondere Ausführung und wurden in einem Artikel in der Zeitschrift für Bauwesen ausführlich beschrieben [Leibbrand 1898]. Sie wiesen einen für Steingelenke äußerst kleinen Wölbradius von 10 bzw. 10,4 cm auf. Für das Verhältnis von Wölbradius zu Gewölbedicke wäre nach Melan⁶⁴⁶ bei einer Gewölbedicke im Scheitel von 0,45 m (bzw. im Kämpfer von 0,50 m) ein Wölbradius von $r_1 = 0,68$ bis 1,35 m (bzw. 0,75 bis 1,5 m), sowie $r_2 = 0,90$ bis 1,80 m (bzw. 1,0 bis 2,0 m) angemessen gewesen. An diesen Zahlen lässt sich erkennen, wie außergewöhnlich klein der Radius hier gewählt worden war. Aus diesem Grund kommt Melan auch zu dem Schluss, dass bei dieser Ausführung *„mehr die Wirksamkeit eines Zapfengelenkes eintritt, Erg. d. Verf., bei dem die Bleieinlage gewissermaßen als Schmierung dient.“* [Melan 1911, S. 208].

Eine große Schwierigkeit bereitete die Verfügbarkeit von geeignetem Material für die Herstellung der Gelenksteine. In der Schweizer Bauzeitung sind Versuche der Firma Dyckerhoff & Widmann beschrieben, die zahlreiche Gelenkquader aus Sandstein, Granit und Beton prüfen ließ [N. N. 1900, S. 79]. Das Verhalten der Gelenksteine wurde genauestens untersucht, dabei erwies sich wiederum *„die Elastizität des Steines als von grossem Einfluss. Granite mit hohen Festigkeiten unterlagen gegen andere Granite mit geringerer spezifischer Festigkeit aber grösserer Elastizität.“* [N. N. 1900, S. 79]. Aus diesen

⁶⁴⁴ Vgl. beispielsweise die Bewertung von Max Leibbrand bezüglich des Einlegens der Bleistreifen, *„die gewissermassen als dauerndes Schmiermittel wirken, während bei den Bleigelenken, wie sie vom Präsidenten v. Leibbrand bisher angewandt wurden, die Bleieinlagen selbst als Gelenke zu wirken haben.“* [Leibbrand 1898, S. 187].

⁶⁴⁵ Vgl. *„Da die Berührung wegen Begrenzung der zulässigen Pressung naturgemäß in einer endlichen Fläche stattfinden muß, so ist die Drucklinie nicht genau festgelegt; ihre Durchgangspunkte werden vielmehr bei den verschiedenen Belastungen wechseln.“* [Emperger 1911, S. 383].

⁶⁴⁶ S. Definition weiter oben (S. 192).

Gründen fiel die Wahl beim Bau des Chemnitztalviaduktes in Chemnitz⁶⁴⁷ letztlich auf Granit aus dem Bayerischen Wald anstatt aus den näheren Steinbrüchen des Fichtelgebirges oder der Lausitz [N. N. 1900, S. 79]. Zudem war man bei dem Naturprodukt Granit nicht gefeit vor Einschlüssen im Material. Letztlich waren beim Einsatz von Steingelenken immer ausführliche und kostspielige Versuche mit den geplanten Gelenksteinen von Nöten. Dementsprechend ist anzumerken, dass die Steingelenke schon bald durch die weiter unten beschriebenen Betongelenke abgelöst wurden.

Ausgeführte Beispiele von Steingelenken

Das älteste Beispiel überhaupt, das zudem auch heute noch existiert, ist die Gottleubabrücke in Langenhennersdorf mit ihren Sandsteingelenken.⁶⁴⁸

Die erste Brücke, die mit Gelenken aus Granit ausgestattet wurde, war wie bereits erwähnt die Eyachbrücke in Imnau mit ihren außergewöhnlichen Gelenkblöcken. Diese Brücke ist nicht erhalten. Eine in der Architektur ähnlich gebaute ist die Eyachbrücke in Owingen⁶⁴⁹ aus dem Jahre 1905 (Abbildung 7.42). Diese Brücke ist eine von zwei baugleichen Brücken der Firma Dyckerhoff & Widmann in Owingen. Die zweite Brücke wurde im Rahmen der Eyach-Regulierung in den 1950er-Jahren überflüssig und deshalb gesprengt. Die Brücke verfügt über eine Spannweite von 30 m.

Heute noch bestehende Granitgelenke in der üblicheren Ausführung mit größeren Wölbadien der Gelenksteine finden sich beispielsweise am Chemnitztalviadukt in Chemnitz (Abbildung 7.43). Das Bauwerk wurde in den Jahren 1898–1899 mit Spannweiten bis zu 43 m von der Firma Dyckerhoff & Widmann erstellt [BWA, Sign. BWA F100, Nr. 664]. Die Gelenke sind heute besonders gut sichtbar, weil bei dem Bogen über die Blankenauer Straße die Verkleidungen entfernt wurden. Abbildung 7.44 zeigt Scheitel- und Kämpfergelenk mit den Dilatationsfugen. Deutlich erkennbar ist der Materialwechsel zwischen Granitgelenk und Gewölbebeton. Die Wahl fiel hier auf Steingelenke, weil man bei Versuchen herausgefunden hatte, dass Betongelenke mit zunehmender Erhärtung an Elastizität verlieren, während die Eigenschaften des Gesteins gleich blieben [Schönbrunn 1899; 1900, S. 7].⁶⁵⁰

Ein weiteres erhaltenes und gut sichtbares Granitgelenk weist die Leinebrücke in Grasdorf aus den Jahren 1899–1900 auf (Abbildung 7.45). Man wählte hier einen Granit aus demselben Steinbruch, wo auch die Gelenkblöcke für die Eyachbrücke in Bad Imnau bezogen worden waren [Séjourné 1913d, S. 133]. Dort waren schon ausführliche Materialversuche durchgeführt und die Eignung nachgewiesen worden [Leibbrand 1898].

⁶⁴⁷ 1898–1899, Beschreibung im Katalog unter Sa5.

⁶⁴⁸ Vgl. Kap. 7.2 sowie im vorliegenden Kapitel weiter oben.

⁶⁴⁹ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü17. Owingen gehört ebenso wie Bad Imnau zur Stadt Haigerloch in Baden-Württemberg. Die ähnliche Ausführung innerhalb derselben Stadt legt die Vermutung zu demselben Planer nahe, das konnte aber im Rahmen dieser Arbeit nicht verifiziert werden, insbesondere auch vor dem Hintergrund des zeitlichen Zwischenraums der Brücken.

⁶⁵⁰ Vgl. Kap. 7.5.4 sowie Fußnote 665.

In einer ausführlichen Beschreibung zum Bau der Grasdorfer Brücke wurden unter anderem die Versetzpraktiken der Gelenkblöcke genau erläutert [Bock, Dolezalek 1901, S. 327–328; S. 332–334]. Dazu wurden beim Betonieren des Bogens der Raum für die Gelenke sowie ein zusätzlicher Streifen von etwa 90 cm Breite ausgespart. Mittels Nivellements und Wasserwaagen wurden die Blöcke einer Gelenkhälfte dann genauestens eingemessen. Erst nachdem diese versetzt waren, wurde der ausgesparte Raum mit Beton ausgestampft (Abbildung 7.46 sowie Abbildung 7.47). Dann erfolgten das Versetzen der anderen Gelenkhälfte sowie deren Hinterstampfen mit Beton [Bock, Dolezalek 1901, S. 332–334].

Mit rund 60 Metern Stützweite ist die Muldebrücke bei Göhren die weiteste hier beschriebene Brücke mit Steingelenken [Séjourné 1913d, S. 124–125; S. 139–142; Abbildung 7.48]. Die Gelenkblöcke wurden ebenfalls aus Granit gefertigt. Bei diesem Beispiel befinden sich die Kämpfergelenke jedoch weitgehend im Erdreich, so dass eine genauere Untersuchung nicht möglich ist.

Betongelenke

Mit der Verbreitung von Beton als Hauptmaterial im Massivbrückenbau und der damit verbundenen Qualitätssteigerung des Materials wurden die Gelenke vermehrt aus Beton hergestellt. Dessen Vorteile gegenüber den Gelenken aus Naturstein waren geringere Kosten, leichtere Beschaffung der geeigneten Materialien sowie die genauere Herstellung in der benötigten Form [Büsing 1905, S. 461].

Ausschlaggebend für die Qualität der Gelenke waren die Betonmischung sowie die bei den Steingelenken bereits besprochene genaue Herstellung der Wälzflächen. Diese wurden bei Betongelenken durch besondere Schalungskästen bewerkstelligt: Diese Formen bestanden meist aus mit Eisenblech ausgeschlagenem Holz [z. B. Melan 1911, S. 208]. Das Eisenblech war notwendig, um die Berührung des Betons mit dem Holz zu vermeiden, „so daß ein Aufsaugen der in dem frischen Beton enthaltenen Feuchtigkeit durch das Holz und ein Verziehen oder Werfen der hölzernen Seitenschalungen ausgeschlossen ist.“ [Zangemeister 1912, S. 207; Abbildung 7.49]. Besonders wichtig war die sorgfältige Ausbildung der Form der gerundeten Gelenkfläche; bekannt sind hierbei Einlagen in den hölzernen Kästen aus Gusseisen, Hartgips oder Beton. Beschreibungen der Schalungskästen finden sich auch in der Literatur, beispielsweise wird in der Deutschen Bauzeitung 1908 beschrieben, der Boden einer solchen Form werde mit einer eisernen Schablone gebildet, deren obere Fläche nach einem bestimmten Halbmesser gekrümmt sei. Um die größtmögliche Genauigkeit zu erzielen, sei diese gehobelt und touchiert [Köhler 1908, S. 286]. Der Regierungsbaurat Blumhardt beschrieb anlässlich des Baus von fünf großen Moselbrücken in Lothringen⁶⁵¹ die Herstellung der Betongelenke so: „Die Quadern wurden (...) in starkwandigen Holzkästen fast trocken gestampft. Die Formen für die gekrümmten Berührungsflächen der Quadern, die auf dem Boden der Holzkasten unverrückbar festlagen, wurden in Gußeisen hergestellt und die Berührungsflächen in der Fabrik ganz genau nach den gegebenen Halbmessern glatt geschliffen.“ [Blumhardt 1908, S. 395]. Probleme ergaben

⁶⁵¹ Brücken von Sierck, Hauconcourt, Mallingen, Moulins, Sauvage; Bau nacheinander 1898–1908.

sich hier durch das Verziehen der gusseisernen Wölbformen, weshalb bei der folgenden Brücke bereits zur Alternative gegriffen und Hartgips verwendet wurde [Blumhardt 1908, S. 396]. Hartgipsformen hatten allerdings den Nachteil, dass sie für jedes Gelenk neu erstellt werden mussten, eine Mehrfachverwendung war nicht möglich [Emperger 1911, S. 394].

Die Betongelenke wurden meist vorab hergestellt, damit sie bis zum Versetzen bereits über eine hohe Festigkeit verfügten [Büsing 1905, S. 461]. Eher als seltener zu werten ist die von Köhler von der Firma Windschild & Langelott beschriebene Herstellung der Widerlagergelenkquader in situ (Abbildung 7.50), auch wenn er in seiner Beschreibung mit dem Zusatz des Wortes „meistens“ eine Standardausführung vorgibt. Dazu werden die Gelenkquader unmittelbar gegen den Widerlagerbeton angestampft und zwar in der Weise, „daß eine durchlaufende eiserne Schablone zur Herstellung der Wälzfläche (...) vorgebaut wird.“ [Köhler 1908, S. 286]. Diese Herstellungsweise hatte nicht nur den Nachteil, dass die Festigkeit bis zum Ausrüsten noch nicht so hoch war wie bei Vorfertigung, auch konstruktiv gab es Schwierigkeiten, weil vorgefertigte Quader witterungsunabhängig und genauer hergestellt sowie die Stampffugen kontrolliert werden konnten. Die Lage der Stampffugen wurde im Allgemeinen so gewählt, dass die Gelenkquader mit der Wälzfläche nach unten in den Formen so hergestellt wurden, dass die Stampffugen genau senkrecht zur Druckrichtung lagen [Mörsch 1968, S. 213]. Die senkrecht zur Kraft liegenden Stampffugen waren wichtig, um Scherkräfte innerhalb der Fugen zu vermeiden. Auch das Handbuch für Eisenbetonbau bezeichnet die In-situ-Herstellungsweise als außergewöhnlich [Emperger 1932, S. 200].⁶⁵²

Die Betonmischungen in Stampfbetonbrücken wurden den Anforderungen angepasst, so auch bei den Gelenken. Meist wurden selbst innerhalb der Gelenkblöcke noch mindestens zwei Mischungen verwendet. Mehr oder weniger gleichlautende Beschreibungen davon finden sich z. B. in [Melan 1911, S. 209]⁶⁵³ oder in [Köhler 1908, S. 286].⁶⁵⁴

Die Vorteile der Betongelenke wurden insbesondere in den Kosten sowie in der architektonischen Wirkung gesehen.⁶⁵⁵ Der Hauptnachteil war die im Laufe der Zeit

⁶⁵² Vgl. „Ihre Herstellung erfolgte, abweichend von dem sonst üblichen Verfahren, Quader zu versetzen, derart, daß auf der festgefügteten Gewölbbeschalung die Form der konkaven Gelenkhälfte in durchaus sicherer Weise hergestellt wurde.“ [Emperger 1932, S. 200].

⁶⁵³ „Als Mischungsverhältnis empfiehlt sich im allgemeinen 1:2:2 bis 1:2½:2½; an den Wälzflächen wird auch noch bessere Mischung und zur Herstellung einer glatten Fläche eine 3 bis 4 cm starke, in 1:1 gemischte Zementmörtelschichte gegeben.“ [Melan 1911, S. 209].

⁶⁵⁴ „Auf diese Eisenfläche wird zunächst zur Herstellung der glatten Wälzfläche eine 3–4 cm starke Zementmörtelschicht im Mischungsverhältnis von 1 Teil Zement zu 1 Teil feinkörnigem Sand aufgebracht und sodann der eigentliche Gelenksteinbeton in Schichten von 10–15 cm Stärke in die Form eingestampft.“ [Köhler 1908, S. 286].

⁶⁵⁵ Vgl. „Die Vorteile, die Betongelenksteine gegenüber solchen aus Gußeisen, Stahl oder Granit bieten, liegen nicht allein in der Ersparnis an Kosten, sondern auch darin, daß diese Steine sich in ganz natürlicher Weise in das Bild des Gewölbobogens einfügen und einen statisch durchaus befriedigenden Eindruck machen, während Gußeisen- oder Stahlgelenke, wenn sie sichtbar bleiben, immer etwas Gezwungenes, statisch und schönheitlich wenig Befriedigendes an sich haben. Es ist deshalb auch versucht worden, sie zu verdecken oder auszubetonieren, was jedoch zu sehr künstlichen Verfahren führt, um Nebenrisse zu vermeiden.“ [Blumhardt

nachlassende Elastizität des Betons, die insbesondere Eugen Dyckerhoff zur Empfehlung veranlasste, Steingelenke zu verwenden.⁶⁵⁶

Ausgeführte Beispiele von Betongelenken

Die erste Brücke, die „auf Wunsch der Baubehörde“ [G.-z. 1896, S. 155] mit Betongelenken ausgestattet wurde, war der Inundationsviadukt der Marienbrücke⁶⁵⁷ in Dresden, der 1894–1896 gebaut wurde (Abbildung 7.51). Der Entwurf der Brücke entstand unter der Oberleitung Claus Köpckes [Eiselen 1896, S. 311].

Zwar erlitt dieses Bauwerk diverse Kriegs- und Brandschäden, Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen und auch die eiserne Strombrücke wurde zwischenzeitlich durch einen Neubau ersetzt, dennoch kann man die ursprüngliche Konstruktion an einigen Bogen noch gut erkennen. Die Gelenke sind als permanente Betongelenke ausgebildet, die stirnseitig mit Sandstein verkleidet sind: Die bogenförmige Berührungsfläche im Kämpfergelenk ist innerhalb der Fuge zu erkennen (Abbildung 7.52b), das Scheitelgelenk ist mit einem Schmuckstein kaschiert (Abbildung 7.52c). Im Überbau ist die Dilatationsfuge durch das Polygonalmauerwerk durchgehend bis heute zu sehen (Abbildung 7.52a). Die Konstruktion wurde bauzeitlich so beschrieben: „Die Bögen besitzen Scheitel- und Kämpfergelenke aus Stampfbetonquadern, die sich mit gekrümmten Flächen aufeinander abrollen können. (...) Die Gelenke bleiben hier unvergossen und auch in der Ueberschüttung und in den Stirnmauern setzt sich über den Kämpfergelenken eine offene Fuge fort, die im unteren Theile der Stirn übrigens mit weichem Kalkmörtel, im oberen nur durch Asphalt-Filzeinlage ausgefüllt ist. Die Beweglichkeit bleibt also dauernd erhalten.“ [Eiselen 1896, S. 310–311]. Die Betongelenkblöcke wurden auch hier mit zwei Betonmischungen hergestellt und „erst ein Jahr nach der Herstellung verwendet.“ [Eiselen 1896, S. 311]. Vertiefende Informationen zu den Vorversuchen mit Betongelenken des Inundationsviaduktes in Dresden finden sich im Kap. 7.5.4.

Lediglich eine beiläufige Erwähnung in der Schweizer Bauzeitung 1899 findet die Verwendung von Betongelenken auf der Eisenbahnlinie Limbach–Wüstenbrand [G. M. 1899, S. 10]. Diese Linie wurde 1896–1897 gebaut und 1950 wieder stillgelegt. Immer noch vorhanden ist der Bahnviadukt über den Pleißebach im Ortsteil Kändler⁶⁵⁸ (Abbildung 7.53) mit seinen bis heute gut erkennbaren Betongelenken. Auf der privat betriebenen Internetseite sachsenschiene.net, die eine Unmenge an Informationen zu sächsischen Eisenbahnbrücken vorhält, ist ein Plan dieser Brücke vorhanden [Herbach

1908, S. 396]. Die Bemessung der Gelenksteine sowie deren spezifische Versagensmechanismen werden im Kap. 7.5.4 analysiert.

⁶⁵⁶ Vgl. „Hr. Eugen Dyckerhoff kam auf Betongelenke zurück und sprach seine Ansicht aufgrund gesammelter Erfahrungen dahin aus, dass bei weit gespannten Gewölben mit grossen Scheitel- und Kämpferdrücken, die besonders bei Eisenbahnbrücken stets auftreten, ein geeigneter natürlicher Stein dem Beton als Gelenkmaterial vorzuziehen sei, weil der Beton im Laufe der Jahre mit zunehmender Erhärtung an Elastizität verliert, während diese bei natürlichem Gestein stets gleich bleibt. Gerade die Elastizität des Gelenkmateriales ist aber für die Gelenke von allergrösstem Werth (...)“ [G. 1900, S. 14].

⁶⁵⁷ Beschreibung im Katalog unter Sa9.

⁶⁵⁸ Beschreibung im Katalog unter Sa17.

2004]: Die heute außer Funktion stehende Brücke verfügt über zwei Hauptbogen mit 20 m Spannweite, Betongelenke sind jeweils im Scheitel und in den Kämpfern vorhanden.

Einige beeindruckende, mit Betongelenken versehene Viadukte haben sich entlang der ehemaligen, 1899–1901 erbauten Eisenbahnstrecke Altenburg–Langenleuba-Oberhain erhalten (Abbildung 7.20 und Abbildung 7.21).⁶⁵⁹

7.5.4 Das Problem des Querzuges im Gelenkblock

Bei der Verwendung von Stein- oder Betongelenken entsteht in der Berührungsfuge beider Gelenkblöcke eine hohe Pressung. Diese wird auf den Gelenkblock weitergeleitet und das dortige Material versucht, seitlich auszuweichen. Dadurch entstehen Zugspannungen, Rissgefahr ist die Folge. Bei Bleieinlagen sowie Wälz- und Zapfengelenken gibt es dieses Phänomen zwar auch, verschärft tritt es jedoch bei Stein- und Betongelenken auf, weil sich hier der Druck auf einer sehr viel kleineren Fläche des Steins bzw. Betons konzentriert.

Die wissenschaftliche Betrachtung dieser Pressungen stammte insbesondere von Claus Köpcke [Köpcke 1888] und Heinrich Hertz [Hertz 1881 und Hertz 1882]. Aus diesen Überlegungen kristallisierten sich drei Berechnungsansätze – nach Köpcke, Barkhausen und Hertz – hervor, die sich im Prinzip jedoch ähneln: In einem 1908 erschienenen Artikel über die Anwendung von Gelenken im Brückenbau wurde beschrieben, dass alle drei darauf zielen, die Radien der Rollflächen so zu bestimmen, „*daß die größte Pressung in der Berührungsfläche ein bestimmtes Maß nicht überschreitet.*“ [Köhler 1908, S. 286].

Köpcke beschrieb im Rahmen seiner Publikation zur Verwendung von Steingelenken in Brückenbogen seine Untersuchungen der Pressungen zwischen den beiden Gelenkkörpern [Köpcke 1888].⁶⁶⁰ Dabei analysierte er eine Gelenkanordnung, die beidseitig in gleichen Abmessungen konvex ausgebildet war. Bei der Annahme gleich starker Zusammenpressungen unter Druck müssen die Berührungsstellen zu ebenen Flächen werden. Daraus berechnete er die entstehende Pressung und die dazugehörige Breite des Berührungstreifens [Köpcke 1888, S. 374–376]. Der Ansatz von Barkhausen wird in [Schuster 1900, S. 232] beschrieben. In den Berechnungsformeln werden die Zusammenhänge zwischen den Radien der Gelenkflächen sowie der größten in der Mitte der Berührungsfläche auftretenden Druckspannungen dargestellt. Durch probeweises Einsetzen und Anpassen der Annahmen erhält man dann Werte für die Radien und die maximale Druckspannung [Schuster 1900, S. 232]. Die Berechnung nach Hertz wurde ursprünglich für die Bemessung im Eisenbau entwickelt.⁶⁶¹ Emperger bezeichnete die Formeln von Hertz als die rechnerisch am einfachsten zu handhabenden [Emperger 1911, S. 398].

⁶⁵⁹ Vgl. Kap. 7.3.

⁶⁶⁰ Köpcke hatte bereits ausführliche Forschungen zu den Pressungen im Bereich des Materiales Eisen ausgeführt, vgl. beispielsweise die Betrachtungen in [Köpcke 1869].

⁶⁶¹ Vgl. z. B. [Weyrauch 1894].

Im Handbuch für Eisenbetonbau sind die drei Bemessungsmethoden dargestellt und mit einer Vergleichsrechnung hinterlegt [Emperger 1911, S. 395–400]. Dabei ergaben sich bei Verwendung der verschiedenen Ansätze nach Köpcke, Barkhausen und Hertz eklatante Unterschiede in den Ergebnissen: Bei gleichen Abmessungen lieferten die Formeln von Köpcke eine Breite der Berührungsfläche von 23,08 cm bei einer Druckbeanspruchung in deren Mitte von 103 kg/cm². Während die Bemessung nach Barkhausen mit 121 kg/m² noch einen in der Größenordnung vergleichbaren Wert liefert, weicht die Breite der Druckfläche mit 14,85 cm schon deutlich ab. Eine noch größere Abweichung liefert die Hertzsche Methode mit 229 kg/cm² bei einer Breite von 8,84 cm. Des Weiteren seien die Ergebnisse in besonderer Weise abhängig von der Annahme des E-Moduls [Emperger 1911, S. 400]. Die Formeln nach Hertz setzten sich letztlich durch, wie Carl von Bach im Rahmen seiner Publikation zu den ausführlichen Versuchen zu Granitgelenken bemerkte: *„Als wissenschaftliche Grundlage für die Beurteilung der Inanspruchnahme des Materials solcher Gelenke pflegt im Bauingenieurwesen zurzeit die Entwicklung von Hertz angesehen zu werden.“* [Bach 1903c, S. 59].⁶⁶²

Wie erläutert, erfolgte die Bemessung der Stein- und Betongelenke über die Begrenzung der Druckspannungen in der Berührungsfläche. Dieser Ansatz ist zwar sachlich nicht falsch, jedoch wird dabei außer Acht gelassen, dass die für das Versagen ausschlaggebende Größe nicht die Druckspannung, sondern die daraus resultierende, quer dazu wirkende Zugspannung ist: Der Block reißt senkrecht zur Berührungsfläche. Der Konflikt zwischen Berechnung und realem Versagensverhalten bestand. Die Bemessungsregeln wurden verwendet, obwohl bekannt war, dass nicht die Druckspannungen maßgebend waren. So schrieb beispielsweise Köhler von der Firma Windschild & Langelott im Rahmen der Untersuchungen zu den bereits erwähnten Moselbrücken: *„Deshalb halten auch nicht immer Steine der größten Druckfestigkeit die größten Pressungen aus, sondern Versuche haben ergeben, daß Granitsteine von geringerer Druckfestigkeit, aber hoher Elastizität, in einer schmalen Fläche belastet, eine höhere Pressung aushielten, als Steine höherer Druckfestigkeit aber geringerer Elastizität.“* [Köhler 1908, S. 286].⁶⁶³ Im Folgenden wird die Entwicklung der Versuche zum Querzug nachgezeichnet.

Insbesondere im Rahmen des Eisenbrückenbaus war das Verhalten zweier Körper im Berührungspunkt untersucht worden [z. B. Winkler 1868, S. 42–45].⁶⁶⁴ Da Eisen aber ein völlig anderes Materialverhalten hat als Stein oder Beton, sich duktil verhält und Zugspannungen aufnehmen kann, waren die dort gemachten Untersuchungen nicht direkt

⁶⁶² Vgl. dazu auch [Emperger 1932, S. 202–203] oder [Schaechterle 1912, S. 91].

⁶⁶³ Vgl. 7.5.3 und auch folgende Zitate: „Granite mit hohen Festigkeiten bei gleichmässig verteiltem Druck unterlagen während der Gelenkprüfung gegen andere Granite, welche weniger spezifische Festigkeit, aber grössere Elastizität besaßen.“ [Schönbrunn 1899; 1900, S. 6]. „Es habe sich dabei gezeigt, dass das härtere Material durchaus nicht unbedingt die grössere Tragfähigkeit ergeben habe. Es komme vielmehr darauf an, dass das Material genügend elastisch sei, um unter dem Drucke eine entsprechende elastische Abflachung anzunehmen und damit eine grössere Fläche zur Druckübertragung zu liefern.“ [Fr. E. 1903b, S. 114].

⁶⁶⁴ Die Problematik des Berührungsproblems in eisernen Brückenlagern wurde ausführlich im Rahmen der Dissertation von Volker Wetzka an der BTU Cottbus untersucht [Wetzka 2010, S. 127–147 sowie Katalog K1, S. 218–229]. Die Verfasserin vorliegender Arbeit verzichtet deshalb auf die erneute Darstellung der dort ausführlich besprochenen Quellen zu den Untersuchungen des Materials Eisen, die sicherlich als Vorläufer der Untersuchungen im Massivbau gewertet werden müssen.

auf den Massivbau übertragbar. Das Verhalten sich berührender Körper analysierte der Physiker Heinrich Hertz in seinen Artikeln über die Berührung fester elastischer Körper ([Hertz 1881] sowie [Hertz 1882]). Der Unterschied bei der Betrachtung duktiler und spröder Werkstoffe liege darin begründet, dass bei plastischen Materialien bei Druckbeanspruchung ein seitliches Ausweichen eintrete bis die Fläche sich derart vergrößert habe, dass die Spannungen wieder aufnehmbar seien. *„Schwieriger ist es, die Erscheinung in spröden Körpern, wie hartem Stahl, Glas, Krystallen zu bestimmen, in welchen eine Ueberschreitung der Elasticitätsgrenze nur als Entstehung eines Risses oder Sprunges, also nur unter dem Einfluss von Zugkräften auftritt.“* [Hertz 1881, S. 165–166]. In dem genannten, späteren Aufsatz präzisiert er den Verlauf der Spannungen vom Berührungspunkt ausgehend in Richtung des Körperinneren so, dass an der Oberfläche Druck herrsche, dieser im weiteren Verlauf *„auf Null sinkt und in Zug übergeht, welcher schnell ein Maximum erreicht und dann mit wachsender Entfernung wieder auf Null absinkt.“* [Hertz 1882, S. 456]. Zusätzlich leitete er seine Formeln zur Spannungsbestimmung her [Hertz 1882].

Auch Carl von Bach, der Gründer der Materialprüfanstalt Stuttgart, untersuchte das Verhalten von druckbeanspruchten Körpern. In seinem Buch *„Elastizität und Festigkeit“* schrieb er, dass bei Druckversuchen das Versagen eintrete, wenn die Querdehnung *„so gross geworden, wie die Längsdehnung beim Zerreißen im Falle von Zugbeanspruchung.“* [Bach 1889–1890, S. 52]. Des Weiteren merkte er an: *„Mit der Genauigkeit, mit welcher die Längsdehnung drei- bis viermal so gross angenommen werden darf, wie die Querdehnung, findet sich auf diesem Wege die Druckfestigkeit gleich dem Drei- bis Vierfachen der Zugfestigkeit“* [Bach 1889–1890, S. 52]. Allerdings resümierte er, dass diese Annahmen in den Druckversuchen *„nicht die erforderliche Bestätigung erfahren“* haben [Bach 1889–1890, S. 52].

Weitere ausführliche Versuchsreihen fanden aus Anlass des Baus des Inundationsviaduktes der Marienbrücke in Dresden in der Königlichen mechanisch-technischen Versuchsanstalt in Charlottenburg statt. Ausführliche Protokolle der Druckversuche von 18 Paar Betongelenken sind im Bayerischen Wirtschaftsarchiv in München erhalten [BWA, Sign. BWA F100, Nr. 422]. Dabei wurden jeweils neun Paare gleicher Abmessungen, jedoch unterschiedlichen Betonalters (4, 13 und 26 Wochen) Druckproben ausgesetzt. Hierbei wurden die Verformungen der Probekörper gemessen. Bemerkenswert in der Auswertung dieser Versuche ist, dass der erste Versuch ausschließlich mit Messgeräten parallel zu den Druckbeanspruchungen ausgestattet ist – es wurde also vermutlich lediglich eine Verkürzung und ein Versagen aufgrund des Überschreitens der Druckfestigkeit erwartet. Bereits der zweite Versuch weist auch Messmarken quer zum Druck auf: Man hatte bereits nach dem Versagen des ersten Probekörper-Paares den richtigen Schluss gezogen, nämlich dass das Versagen durch Aufreißen senkrecht zur Berührungsfläche eintritt. Die Ergebnisse fasst Otto Colberg, Direktor der Firma Dyckerhoff & Widmann, anlässlich eines Artikels über die Illerbrücken in Kempten, deren Nebenbogen mit Betongelenken ausgeführt wurden, im Hinblick auf die Abmessungen von Betongelenksteinen nochmals zusammen [Colberg 1906]. Die Länge der Gelenkblöcke wurde nahezu gleich der Gewölbstärke an der betreffenden Stelle gewählt. Dieses Maß habe sich aus den ausgedehnten Versuchen zu den Gelenkblöcken

des Inundationsviadukts der Marienbrücke in Dresden ergeben. Maßgebend für die Bemessung dieser Blöcke seien die Dehnungsvorgänge, die darauf hinweisen, dass im Abstand von etwa der halben Gewölbstärke von der Berührungsfläche entfernt die größte Querdehnung stattfindet und somit auch die größten Zugspannungen auftreten. Daraus folge auch, dass an dieser Stelle ein Materialwechsel, etwa vom harten Naturstein auf den benachbarten Gewölbebeton bzw. von einer fetteren zu einer mageren Betonmischung zu vermeiden sei, „*daß vielmehr dieser Uebergang erst in etwa der doppelten Entfernung von den Berührungsflächen eintreten möchte, daß mit anderen Worten der Gelenkstein im Vertikalschnitt etwa quadratisch zu bemessen ist.*“ [Colberg 1906, S. 262]. Von großer Wichtigkeit war zudem noch das Verhältnis zwischen Druck- und Zugfestigkeit des Materials. Denn nur wenn dieses Verhältnis bekannt war, konnte man in der Bemessung darauf achten, maximal diejenige Druckbeanspruchung zuzulassen, die ein Versagen des Gelenkblockes durch Querkzug vermied. Die Untersuchungen zum Inundationsviadukt lieferten hierzu Aufschlüsse: „*Selbst ohne über die Größe des Elastizitätsmoduls für Zug des Betons vollkommene Gewißheit zu haben, konnte damals aus den vorgenannten Versuchen die Folgerung gezogen werden, daß bei gleichartigen Gelenkquadern die Größe der Zugspannung rechtwinklig zur Druckrichtung $Z = 0,28 D$ oder rund ein Viertel der Druckspannung betrug.*“ [Colberg 1906, S. 262]. Damit lieferten die Ergebnisse auch eine Bestätigung und Präzisierung der Annahmen von Bachs.

Die Veröffentlichungen von Bachs aus den Jahren 1903 [Bach 1903c] und 1904 [Bach 1904] dokumentieren ausführliche Versuche an Granit- und Sandsteinquadern. Das Versagen tritt nach von Bach in Form eines Hauptrisses auf (Abbildung 7.54). Dort sei im mittleren Teil des Steines die Fuge geöffnet, zu den Stirnflächen hin geschlossen. Daraus folge anschaulich, dass der Riss durch Zugspannungen im Material veranlasst worden sei. Werde der Stein entlastet, so schließe sich die Fuge in der Mitte. Die Teile links und rechts des Risses verhalten sich ähnlich wie auf Knicken beanspruchte Stäbe, die an den Enden verbunden sind [Bach 1903c, S. 72]. Von Bach zieht hieraus die richtigen Schlüsse: „*Aus dieser Sachlage heraus erkennt man sofort, daß es sich im Falle der Herstellung der Gelenkquader aus Beton empfiehlt, Eisenstäbe zur Aufnahme der Zugspannungen einzulegen.*“ [Bach 1903c, S. 72].

Verschärft wurde das Problem des Querkzugsversagens bei flachen Stampfbetonbrücken im Scheitel: Bei der Verwendung eiserner Gelenke wurden die Anschlussteile oft nicht aus zuvor gefertigten Kunststeinen hergestellt, sondern direkt vor Ort gestampft. Hier verlaufen die Stampfschichten parallel zu den auftretenden Druckkräften, die Zugfestigkeit ist also zusätzlich zum Material auch vom Verbund der verschiedenen Schichten abhängig [Mörsch 1924, S. 161]. Auf ein anderes baupraktisches Problem wies Eugen Dyckerhoff hin: Seiner Meinung nach seien Steingelenke den Betongelenken vorzuziehen, da deren Eigenschaften gleich bleiben, wohingegen der Beton im Laufe der Jahre an Elastizität verliere. Diese Eigenschaft sei jedoch gerade für die Gelenke von „*allergrösstem Wert*“ [Schönbrunn 1899; 1900, S. 7].⁶⁶⁵

⁶⁶⁵ Vgl. Fußnote 656. Dies war auch der Grund, warum Dyckerhoff & Widmann von den Betongelenken wieder abkam. Während die Marienbrücke 1894–1896 noch mit Betongelenken versehen war, wurde bei späteren

Anlässlich des Baus der bereits erwähnten Moselbrücken (1898–1908) wurden Versuche an Gelenkquadern in Originalgröße vorgenommen. Nachdem bei zwei Gelenkpaaren jeweils im konkav geformten Betonblock der senkrechte Riss aufgetaucht war und da man für die weiteren Brückenbauten noch höhere Gelenkdrücke aufnehmen musste, wurden Versuche mit bewehrten Blöcken gemacht.⁶⁶⁶ Die Versuchsergebnisse waren durchaus überzeugend, aus praktischen Gründen verzichtete man bei der folgenden Moselbrücke von Mallingen dennoch auf die Einlage von Querbewehrung. Der Grund dafür war, dass man das Verschieben der Stäbe beim Stampfen der Blöcke befürchtete.⁶⁶⁷ Im Rahmen dieser Versuche stellte man weiterhin fest, dass, während die bisherigen Versuche mangels genügend starker Maschinen lediglich die Last bei der Rissentstehung feststellten, die Bruchlast wesentlich höher war, „*sie beträgt beinahe das Doppelte derjenigen, die die ersten Risse verursachte.*“ [Blumhardt 1908, S. 396]. Die für die Sicherheit relevante Größe sei aber die Bruchlast, so dass die Sicherheit der Gelenkblöcke ausreichend sei [Blumhardt 1908, S. 396].⁶⁶⁸

Wenngleich die Betongelenke für die Moselbrücken noch unbewehrt blieben, gab es in den folgenden Jahren Beispiele für Betonblöcke mit Eiseneinlagen. Diesbezüglich boten sich entweder Stabeinlagen quer zur Druckrichtung oder Umschnürungen an.⁶⁶⁹ Abbildung 7.55 zeigt ein frühes Beispiel für Stabeinlagen, nämlich die Augustusbrücke in Dresden.⁶⁷⁰ Dort wurden Eisenstäbe (Ø 8 mm) quer zur Druckrichtung eingebaut [Preßprich 1910, S. 363–364]. Auf Längs-Eiseneinlagen wurde im Allgemeinen verzichtet, weil diese das Stampfen zu sehr beeinträchtigt hätten [Emperger 1932, S. 199]. Die gestrichelt dargestellten, in den Betonblock hineinragenden Bauteile stellen dabei Versetzhilfen dar: Der Anker bzw. die Schlauder diente zum Befestigen des Blockes am Versetzkran. Für diese Vermutung sprechen die zentrische Lage sowie deren Ausrichtung im Kämpfer schräg bzw. im Scheitel senkrecht. Die fotografische Aufnahme vom Versetzen der Blöcke bestätigt diese Annahme, im beschreibenden Text sind hierzu allerdings keine Angaben zu finden.

von selbiger Firma erbauten Bauwerken mit Wälz Gelenken auch wieder Granit als Gelenkmateriale gewählt (beispielsweise Chemnitztalviadukt in Chemnitz, Eyachbrücken in Owingen usw.).

⁶⁶⁶ Vgl. „Um ferner das Aufschlitzen der Steine in der Richtung des größten Druckes zu verhüten, sollten die Gelenksteine quer zur Druckrichtung Eiseneinlagen aus geraden Stäben erhalten. Diese Eiseneinlage bestand aus 16 Stück Flacheisenstäben von 720 mm Länge und 100/10 mm Stärke, die gleichmäßig über den Querschnitt 50:90 cm verteilt waren.“ [Blumhardt 1908, S. 395].

⁶⁶⁷ Vgl. „Von einer Eiseneinlage in die Quadern wurde Abstand genommen trotz des günstigen Ergebnisses der Druckversuche. Man fürchtete, daß beim Stampfen des Betons, das in besonders sorgfältiger Weise mit Hammer und Eisenplatte vorgenommen wurde, die Stäbe kein ruhiges Lager behalten und so Hohlräume entstehen würden, die von schädlichem Einfluß auf die Festigkeit der Quadern sein könnten. Diese Mißstände werden sich durch geeignete Maßregeln beseitigen lassen, es wurde jedoch dem festen gleichmäßigen Beton der Vorzug vor künstlichen [sic] Verstärkungen gegeben.“ [Blumhardt 1908, S. 395].

⁶⁶⁸ Vgl. „Dann wird man sich aber auch nicht zu scheuen brauchen, statt Gelenke aus Gußeisen oder Stahl, oder solcher aus Granit Betongelenksteine zu verwenden, insbesondere nicht, wenn man sie für größere Druckbeanspruchungen noch durch Eiseneinlagen verstärkt.“ [Blumhardt 1908, S. 396].

⁶⁶⁹ Vgl. „Bei einigen neueren Ausführungen hat man diese Betongelenkquadern auch mit Eisen armiert, um ihre Druckfestigkeit zu erhöhen. Vorteilhaft erscheint vor allem eine Armierung mit ringförmigen Bügeln oder Spiralumschnürung oder auch nur die Einlage von Eisenstäben quer zur Druckrichtung.“ [Melan 1911, S. 209–210].

⁶⁷⁰ 1907–1910; Beschreibung im Katalog unter Sa6.

Erst 1924 gibt Emil Mörsch in einem Artikel in „*Beton und Eisen*“ den Anstoß zu einem neuen Berechnungsansatz. Er bemängelte: „*Die bisher übliche Berechnungsweise solcher Gelenkquader ermittelt und begrenzt die größte Druckspannung im Berührungstreifen auf der Gelenkseite. Sie befriedigt nicht, da man aus zahlreichen Versuchen weiß, daß sowohl die Quader der steinernen Wälzgelenke als auch die durch eiserne Gelenkstücke auf begrenzte Streifen gedrückten Quader durch quergerichtete Zugspannungen zerstört, d. h. in der Druckrichtung gespalten werden.*“ [Mörsch 1924, S. 156]. Mit Hilfe der Spannungstrajektorien entwickelte Mörsch Formeln zur Ermittlung der Querkzugkraft, die nach seiner Aussage die Versagensursache besser treffen als die Hertzschen Formeln [Mörsch 1924, S. 161]. Wenn diese maximal $\frac{1}{4}$ der Festigkeit des Stein- oder Betonmaterials erreiche, sei ausreichende Sicherheit vorhanden [Mörsch 1924, S. 161].

7.5.5 Wälzgelenke

Ein ähnliches Prinzip wie die Stein- und Betongelenke wiesen die Wälzgelenke auf, die aus Gusseisen oder Stahlguss bzw. seltener aus Schmiedeeisen bzw. Stahl hergestellt wurden. Auch hier wurden die beiden Gelenkteile mit verschiedenen Radien gekrümmt, die Bogenschenkel konnten dadurch rotieren. Der große Vorteil eiserner Wälzgelenke war die höhere Druckfestigkeit: Auf diese Weise konnte der Krümmungsradius kleiner gewählt werden, die Berührungsfläche wurde kleiner, die Reibung geringer und der Durchgangspunkt der Stützlinie konnte noch genauer definiert werden [Emperger 1911, S. 403].

Erstmals in einer Massivbrücke eingesetzt wurden eiserne Wälzgelenke bei der 1893 erbauten und im Zweiten Weltkrieg zerstörten Donaubrücke in Munderkingen (Abbildung 7.56). Aufgrund der starken Druckspannungen hatte man befürchtet, dass Bleieinlagen zu stark geflossen wären oder sie hätten eine zu große Breite erhalten müssen [Gugenhan 1894, S. 493]. Die Munderkinger Gelenke wurden noch mit Lagerkästen aus I-Profilen mit aufgenieteten Blechen hergestellt (Abbildung 7.56).

Es sind zwar einige zu den Munderkinger Gelenken ähnliche Ausführungen mit solchen Lagerkästen bekannt,⁶⁷¹ dennoch ist diese Ausführungsweise als Ausnahme zu werten, durchsetzen konnte sie sich nicht. Üblich wurden Gelenkausbildungen mit Gelenkstühlen, entweder ein- oder zweiteilig. Zweiteilige Ausführungen bestanden aus einem gusseisernen Stuhl mit eingesetztem Wälzstück aus Stahlguss, wie dies beispielsweise bei den Illerbrücken in Kempten geplant war⁶⁷² sowie bei einigen Brücken des Münchner Brückenbauprogramms⁶⁷³ ausgeführt wurde, beispielhaft zeigen die folgenden Abbildungen die Ausbildung der Gelenke der Maximilians- und der Corneliusbrücke (Abbildung 7.57 sowie Abbildung 7.58).

⁶⁷¹ Z. B. Pont de la Coulouvrenière in Genf, 1896 (s. bei den ausgeführten Beispielen); Schlitzabrücken bei Tarvis, 1901–1902 [Stanek 1903, Tafel 39]; Addabrücke Morbegno, 1902–1903 [Séjourné 1913d, S. 68]; Etschbrücke bei Forst, 1903 [Melan 1911, S. 216].

⁶⁷² Vgl. die vom Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten zur Kenntnis überlassene Plankopien [Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten, Sign. keine, Blatt 10].

⁶⁷³ Vgl. Fußnote 366.

Einteilige Wälzgelenke erforderten den geringeren Aufwand, da das ganze Gelenkstück in einem hergestellt werden konnte. Allerdings wurde dafür das komplette Gelenk im höherwertigen Material Stahlguss hergestellt.⁶⁷⁴ Abbildung 7.59 zeigt das einteilige Wälzgelenk des Igelsbachviadukts der Wieslauftalbahn.

Die Lagerstühle bzw. Lagerkästen haben die Aufgabe, den konzentrierten Druck aus dem Gelenk auf eine ausreichend große Fläche des anliegenden Gewölbes zu verteilen. Auch hier tauchte die bereits in Kap. 7.5.4 ausführlich behandelte Problematik des Querzugs im Gelenkblock auf. Um deshalb in diesem Bereich Spannungsspitzen zu verhindern, musste die Rückseite der Gelenklagerstühle sauber abgearbeitet werden. Zur sichereren Übertragung, wurde im Allgemeinen zwischen Lagerstuhl und Gewölbe eine lastverteilende Bleiplatte, seltener eine Mörtelfuge, eingebracht [z. B. Emperger 1911, S. 404; Abbildung 7.57]. Alternativ konnte der Gewölbebeton direkt gegen das Gelenk angestampft werden [Mörsch 1968, S. 220].⁶⁷⁵

Vor- und Nachteile der verschiedenen Gelenkmethode fasst Emil Mörsch 1904 anlässlich des Baus der Grünwälder Isarbrücke zusammen. Er habe dort Gelenke aus Stahlguss gewählt, da diese die möglichst genaue Übereinstimmung von Bemessung und Ausführung gewährleisten. Von den Bleigelenken abgesehen seien noch Steingelenke in Frage gekommen. Jedoch müssen hier bei großen Druckspannungen große Krümmungsradien gewählt werden, die eine genügende Berührungsfläche liefern. Infolgedessen sei der Angriffspunkt des Gelenkdruckes nicht genügend fixiert und es können beim Abrollen eines derartigen Steingelenkes beachtliche Reibungswiderstände auftreten. Auch haben Versuche mit Steingelenken ergeben, dass sehr hartes Gestein nicht geeignet sei, sondern nur verhältnismäßig weiches Gestein von gleichmäßigem Gefüge. Ein weiterer Nachteil, der kaum beachtet werde, sei die Verschiebung der Berührungslinie: *„Tritt nämlich ein geringes Ausweichen der Widerlager ein, so muss der Berührungspunkt des Gelenks, um dessen Drehung zu ermöglichen, einen ziemlich grossen Weg zurücklegen, er wird also eine exzentrische Lage einnehmen.“* [Mörsch 1904, S. 265]. Dahingehend sei ein beachtenswertes Beispiel die Ausstellungsbrücke in Düsseldorf von 1902,⁶⁷⁶ bei der die Bruchversuche gezeigt haben, dass die Berührungslinien der Gelenkblöcke im Scheitel bereits ins obere Drittel, in den Kämpfern ins untere Drittel gerückt seien. *„Alle diese Mängel sind bei Stahlgelenken nicht vorhanden, die ausserdem leichter und billiger hergestellt und genauer versetzt werden können.“* [Mörsch 1904, S. 265].

Ausgeführte Beispiele von Wälzgelenken

Eine frühe erhaltene Brücke mit Wälzgelenken ist der Pont de la Coulouvrenière in Genf von 1896. Die Gelenke dieser Brücke werden als Kopie der Gelenke der Munderkinger Donaubrücke bezeichnet [Büsing 1899, S. 345], auch hier wurden die Gelenke nachträglich

⁶⁷⁴ Maximal zulässige Beanspruchungen [nach Emperger 1911, S. 405]: Gusseisen 4,0 t/cm², Flusseisen 5,5 t/cm² und Stahlguss 7,0 t/cm² (etwa gleich 700 MN/m²).

⁶⁷⁵ Vgl. „Die Druckflächen der Lagerstühle brauchen nicht bearbeitet zu werden, sofern man den Beton direkt dagegenstampft.“ [Mörsch 1968, S. 220].

⁶⁷⁶ Vgl. Kap. 4.4.

vermörtelt [G. M. 1896, S. 101]. Die Gelenke sind nicht sichtbar, die Brücke hat in neuerer Zeit massive Eingriffe erlitten.

Weitere erhaltene Beispiele wurden bereits im Text erwähnt und abgebildet. Ein sehr interessantes Beispiel eines Wälzgelenks ist das der Illerbrücke in Lautrach: Dieser Brücke ist ein eigenes Kapitel gewidmet.⁶⁷⁷

7.5.6 Verschiebungen im Gelenk: Rutschen und Gleiten

Die bisher beschriebenen Gelenke halten sich innerhalb der Gelenkfuge ausschließlich über Reibung in der korrekten Lage. Durch die hohe Pressung, die das Gewölbe auf das Gelenk ausübt, war die Reibung in den meisten Fällen auch ausreichend groß. In einigen Fällen kam es allerdings zu Verschiebungen im Gelenk. Dabei muss man genau genommen zweierlei Phänomene unterscheiden: Während des Baus des Bogens kam es durch mangelnde Fixierung der Gelenkstühle mit dem Bogen bzw. der beiden Gelenkteile untereinander zu Verrutschungen – diese werden nachfolgend als „Rutschen“ bezeichnet. Davon abweichend, wenngleich im Ergebnis vergleichbar, war das Abgleiten der Gelenkteile durch Überschreiten des Reibungswiderstandes durch auftretende Querkräfte im fertiggestellten Bogen, im Weiteren als „Gleiten“ bezeichnet. Beide Phänomene sowie Maßnahmen zur Abhilfe sollen im vorliegenden Kapitel dargestellt werden. Dabei ist die genaue Trennung schwierig: Einige der Bauteile wirken sicherlich gegen beide Phänomene, Hinweise erfolgen an entsprechender Stelle.

Fixierung des Gelenkes während des Baus: Vermeidung des Rutschens

Zum Phänomen des Rutschens ist erstmals bei einer Dreigelenkbrücke im Rahmen des Baus der Munderkinger Donaubrücke ausführlich berichtet worden: *„Zufolge einer ungenügenden Unterstüztung der Enden des Lehrgerüsts hatten sich die Enden des Brückenbogens während des Wölbens gegenüber den Widerlagern um 6,5 bis 15 mm gesenkt und die Stahlgelenke sind demgemäss theils lose, theils excentrisch geworden; es musste deshalb der Beton zu beiden Seiten der Gelenke ausgespitzt und die letzteren genau versetzt und in ihrer Lage gesichert werden; dies ist mit sehr einfachen Mitteln dadurch geschehen, dass die beiden, ein Gelenk zwischen sich tragenden eisernen Kästen unverrückbar zusammengeschraubt und an feste Punkte der daneben befindlichen Betonmauer aufgehängt wurden. Die Scheitelgelenke wurden gleichfalls zusammengeschraubt, auf mit Eisen beschlagene Hölzer der Schalung aufgestellt und mit eisernen Keilen genau in die richtige Lage gebracht. So gelang es, die Gelenke völlig genau zusammenzupassen und sie auch in dieser Lage zu erhalten.“* [Leibbrand 1894, S. 553–554].

Beim Bau von Stampfbetonbrücken wurden die Gelenkblöcke mitsamt den Gelenkvorrichtungen entweder vorab verlegt⁶⁷⁸ oder zumindest mit Abstand zwischen

⁶⁷⁷ Vgl. Kap. 8.4.

⁶⁷⁸ Z. B. Munderkingen [Leibbrand 1894, S. 553], bei der Illerbrücke Lautrach (vgl. Kap. 8.4) oder auch bei den Schlitzabrücken in Tarvis [Staneek 1903, S. 348].

Gelenkblock und Gewölbe,⁶⁷⁹ der erst nachträglich geschlossen wurde. Das heißt aber wiederum, dass die Gelenke noch nicht unter Druck standen und auf diese Weise leichter rutschen konnten. Verschärft wurde das Problem durch die Erschütterungen aus dem Stampfen.

Ein Beispiel, bei dem im Kämpfer die oberen Kämpferteile innerhalb der Berührungsfuge abrutschten, ist die Maximiliansbrücke in München.⁶⁸⁰ Hier beschreibt Dietz, dass es trotz größter Sorgfalt problematisch sei, alle Gelenke so zu versetzen, dass sie letztlich den gleichen Druck erhielten. Als Beweis sieht er das festgestellte Rutschen während des Baus: *„Das [sic] dem so ist, hatte sich auch während der Aufstellung gezeigt, indem bei allen Kämpfer-Gelenkreihen, aber nicht bei allen Gelenken, ein Abwärtsgleiten der oberen Gelenkhälfte an der unteren bis zu 1 cm beobachtet wurde, als die Bogen noch auf dem Lehrgerüste vollständig ruhten. Diese Verschiebungen wurden durch Ziehen der Gelenkhälften [o] [also der oberen Gelenkhälften im Kämpfer, Anm. d. Verf.] vor dem Freisetzen der Bogen wieder beseitigt. Diese Arbeit beanspruchte großen Kraftaufwand, da ja hierbei der Reibungswiderstand zwischen den Oberflächen der oberen Gelenkhälften [o] und den daselbst eingelegten, fest an die Granitquader gepreßten Bleiunterlagen maßgebend war.“* [Dietz 1904, S. 1408–1409].

Um die Lage der Gelenke untereinander zu gewährleisten, wurden sie – wie oben beim Bau der Munderkinger Brücke erstmals beschrieben – durch Bolzen miteinander verschraubt (Abbildung 7.60). Meist wurden diese Bolzen nach Fertigstellung des Bogens, jedoch vor dem Ausrüsten durchgesägt.⁶⁸¹ Das Durchsägen der Bolzen vor dem Ausrüsten war sicher der Standardfall, dazu gibt es diverse Hinweise in der Literatur.⁶⁸² Beim Bau der Grünwalder Brücke in München berichtet deren Erbauer Emil Mörsch jedoch, dass die Gelenkhälften durch vier Schrauben miteinander verbunden gewesen seien: *„Die schwache Schraubverbindung braucht nicht entfernt zu werden, da sie den auftretenden Kräften keinen nennenswerten Widerstand entgegensetzen kann.“* [Mörsch 1904, S. 265].⁶⁸³ Beim Igelsbachviadukt der Wieslaufalbahn in Klaffenbach kann man bis heute die nicht durchtrennten Bolzen erkennen (Abbildung 7.61). Die Bolzen wurden nicht nur bei Wälzgelenken eingesetzt, auch vom Bau der Eyachbrücke in Imnau mit ihren Granitgelenken ist der Einsatz von Bolzen nachweisbar.⁶⁸⁴ Ebenso wurden beim Bau der

⁶⁷⁹ Z. B. bei der Inzigkofener Donaubrücke [Leibbrand 1895/96, S. 75], Isarbrücke Grünwald [Mörsch 1904, S. 266], oder auch bei der Leinebrücke Grasdorf [Bock, Dolezalek 1901, S. 327; vgl. Kap. 7.5.3].

⁶⁸⁰ Beim Bau der Maximiliansbrücke gab es zwei Bauunfälle: das hier beschriebene Abrutschen im Bauzustand und das im vorliegenden Kapitel weiter unten beschriebene Gleiten der Gelenke nach erfolgtem Ausrüsten der Bogen.

⁶⁸¹ Vgl. „Nach Schluss des Gewölbes hat man die Verschraubung der beiden Hälften eines Gelenkes beseitigt“ [Leibbrand 1894, S. 554].

⁶⁸² Vgl. z. B. [Colberg 1906, S. 263–264], [Melan 1911, S. 211; S. 216].

⁶⁸³ Weiteres Beispiel: Eisenbahnbrücke über den Neckar bei Tübingen: „(...) ein Zeichen, daß die Gelenke gleichmäßig versetzt und gut ausgerichtet waren und trotz der Schraubenverbindung, welche zur Sicherung gegen etwaige Verschiebungen belassen wurden, ausgezeichnet funktionieren.“ [Jori, Schaechterle 1911a, S. 10–11].

⁶⁸⁴ Vgl. „Die Quader wurden vor dem Versetzen nach Einlage des Bleies mit eisernen Schraubenbolzen fest verschraubt und diese Bolzen erst vor dem Ausschalen entfernt“ [Leibbrand 1898, S. 189].

Inzigkofener Donaubrücke, die über Zapfengelenke⁶⁸⁵ verfügte, die Gelenkhälften verschraubt.⁶⁸⁶

Um die auftretenden Schwierigkeiten des millimetergenauen Versetzens und auch die Angst vor dem Rutschen des Gelenkes besser nachvollziehen zu können, muss man sich wohl noch über deren Gewicht klar werden, zu Inzigkofen wissen wir: *„ein aus drei Teilen bestehendes Kämpfergelenk (2 Stühle und 1 Bolzen) wiegt rund 700 kg, ein Scheitelgelenk ebenso 600 kg.“* [Leibbrand 1895/96, S. 75]. Die Gelenke in Munderkingen wogen immerhin noch jeweils 400 kg [Gugenhan 1894, S. 493].⁶⁸⁷ Das Rutschen eines solchen Gelenkes konnte also ernsthafte Schäden anrichten. Das genaue Versetzen war wiederum wichtig, um die einwandfreie Funktion des Gelenkes sicherzustellen: *„Es ist von größter Wichtigkeit, daß die Axen aller Gelenke genau in einer geraden Linie normal zum Gewölbe liegen, da sonst eine gleichzeitige Drehung um deren Axe nicht möglich ist, wodurch Nebenspannungen auftreten, welche den Wert der Gelenke hinfällig machen können.“* [Leibbrand 1895/96, S. 75]. Lediglich eine Variante stellt die von Max Leibbrand patentierte Form mit seitlich angegossenen Laschen und deren Verschraubung dar, wie in Abbildung 7.62 dargestellt. Eingesetzt wurde sie bei der Donaubrücke in Sigmaringen,⁶⁸⁸ 1907–1909 [Séjourné 1913d, S. 254–255].

Während die Schraubbolzen einzig die Lage der Gelenkteile untereinander sicherten, musste weiterhin auch die Lage der Gelenke in Bezug auf den Gelenkblock gewährleistet werden. Im Allgemeinen wurden die Gelenke lediglich auf *„unterstützenden Hölzern“* [Mörsch 1968, S. 220], die eventuell mit Holzkeilen oder Schrauben zur Feinjustierung ausgestattet waren [Emperger 1911, S. 406], aufgelagert. Auch Leibbrand beschreibt diese Montageart bei der Inzigkofener Brücke.⁶⁸⁹ Die Abbildung 7.63 zeigt das Scheitelgelenk der Prinzregentenbrücke in München während des Bauzustandes. Deutlich zu erkennen ist die recht einfach gehaltene Stützkonstruktion aus mehreren untergelegten Hölzern.

Diese kostengünstigen Holzunterkonstruktionen waren jedoch fehleranfällig, so dass es verschiedene Möglichkeiten der Abhilfe gab. Bereits früh begann man damit, die Gelenkstühle in den Gelenkblock einzubetonieren. Die Beweglichkeit des Gelenks wurde durch eine Trennlage in der Gelenkfuge beim Betonieren aufrechterhalten.⁶⁹⁰ Von den Illerbrücken in Kempten ist bekannt: *„Diese zusammengeschrabten Gelenke wurden alsdann einbetoniert, wobei jedoch beiderseits der Wälzflächen zur Erzielung des nötigen*

⁶⁸⁵ Vgl. Kap. 7.5.7.

⁶⁸⁶ „Die Auflagerplatten der Gelenke waren mit je 4 Oesen versehen, durch welche Schraubenbolzen gezogen wurden, um die Gelenkteile während des Verlegens der Gelenke und während des Betonierens in ihrer gegenseitigen Lage festzuhalten.“ [Leibbrand 1895/96, S. 74].

⁶⁸⁷ Vgl. Rosensteinbrücke in Stuttgart-Bad Cannstatt: bis zu 1,7 t für ein Gelenkpaar [Spangenberg 1914, S. 92].

⁶⁸⁸ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü20.

⁶⁸⁹ „Für die Kämpfergelenke waren Aufsattelungen über den Kranzhölzern des Lehrgerüsts angebracht (...). Die Scheitelgelenke wurden auf Unterlagshölzern unmittelbar auf die Gewölbschalung aufgesetzt.“ [Leibbrand 1895/96, S. 74–75]. Weiteres Beispiel sind die Schlitza-Brücken in Tarvis: „Die Scheitelgelenke wurden direkt auf das Gerüst aufgelagert und durch Keile in die richtige Position gebracht.“ [Stanek 1903, S. 348].

⁶⁹⁰ Siehe hierzu auch das Fallbeispiel Illerbrücke Lautrach, Kap. 8.4.

Spieles der Gelenke Korkplatten von 1 cm Stärke, zwischen Zinkblechen No. 5 von ¼ mm Stärke gefaßt, eingelegt wurden.“ [Colberg 1906S. 263–264].⁶⁹¹

Das Einbetonieren der Gelenkteile mithilfe von an den Gelenken angebrachten Stahlbauteilen beschreiben Jori und Schaechterle 1911 im Rahmen des Artikels über die Wieslaufalbahn (Abbildung 7.64): *„Das Versetzen der Gelenke geschah in der Weise, daß die durch Schrauben verbundenen Stahlgelenkhälften sorgfältig ausgerichtet und mittels Winkeleisen unverschiebbar aufgestellt und verspannt wurden, womit ein direktes Hinterbetonieren und Stampfen möglich war.“* [Jori, Schaechterle 1911a, S. 46]. Mörsch ergänzt hierzu: *„Im Scheitel kann dann jedes Gelenkstück mit den vier Winkeln auf Betonklötzchen gestellt und durch Rücken und Unterlegen von Eisenkeilchen in die richtige Lage gebracht werden.“* [Mörsch 1968, S. 224].

Für die Gelenke am Kämpfer rät Mörsch von dieser Art allerdings explizit ab, was bei Berücksichtigung der dortigen Schräglage der Gelenke auch sofort einleuchtet. Dort seien Stellschrauben vorzuziehen. Die Vorläufer dieser Stellschrauben waren Steinschrauben ohne Justiervorrichtung zum Aufhängen der Gelenke an den anliegenden Bogenteilen. Das erste Beispiel wurde schon zu Beginn dieses Kapitels bei den Schraubbolzen zitiert, die Donaubrücke bei Munderkingen; dort wurde das Gelenk verschraubt *„und an feste Punkte der daneben befindlichen Betonmauer aufgehängt“* [Leibbrand 1894, S. 553]. Beim Bau der Maximiliansbrücke in München wurden die unteren Teile der Kämpfergelenke auf Rundeisen gesetzt, die in den Bogen eingelassen waren [Dietz 1904, S. 1408], eine der Verwendung von Schrauben sehr ähnliche Variante. Bis heute kann man diese Aufhängevorrichtung beim Gelenk der Corneliusbrücke in München erkennen (hierzu Abbildung 7.65): *„Die aus Stahlguß hergestellten Gelenkstücke sitzen in gußeisernen Lagerböcken, die auf Bleiplatten versetzt und durch Steinschrauben an den Quadern befestigt sind.“* [Melan 1911, S. 212].⁶⁹²

Steinschrauben mit Stellvorrichtung wurden beispielsweise bei der Neckarbrücke in Heidelberg verwendet. Wie in Abbildung 7.66 dargestellt ist, wird eine Gelenkhälfte mit Winkeleisen wie zuvor beschrieben ausgeführt. Die andere Seite wird durch in den Beton eingelassene Schrauben justierbar gemacht. Erst nach dem Feinjustieren wird zuerst der

⁶⁹¹ Weiteres Beispiel sind die Schlitz-Brücken in Tarvis: *„Selbstverständlich waren die Gelenkkastenträger in den Widerlagern bereits früher einbetoniert.“* [Stanek 1903, S. 348].

⁶⁹² Sehr ausführlich beschreibt Emperger die Vorgehensweise bei der Wallstraßenbrücke in Ulm: Die Gelenke waren mit Schraubenbolzen gegeneinander verschraubt. *„Zur Festlegung der genauen Lage der Gelenke wurden zunächst in die Gelenkbetonlamellen Schrauben in Abständen von 67 cm einbetoniert, welche etwa 7 cm über den Beton vorstanden. Auf die vorstehenden Gewinde wurden Schraubenmutter aufgesetzt und diese genau in die Flucht der Gelenkauflagerflächen gebracht. Gegen diese Mutter wurden die mit einem fahrbaren Flaschenzug emporgehobenen Gelenke gelehnt und zwar jedes Gelenk gegen vier Schrauben: Weiterhin waren in jedem Gelenk an den Kopfenden zwei zylindrische Stahlzäpfchen etwa 15 mm tief in die Achsen eingesteckt, so daß sie von einem Gelenkstück zum anderen übergriffen. Hierdurch wurde eine gute Zentrierung ermöglicht, sowie der Abstand der einzelnen Gelenkstücke voneinander reguliert. Ferner war auf den Gelenkrückenflächen die Mittellinie aufgerissen, so daß die Gelenke auch in genaue Höhenlage gebracht werden konnten. Endlich ruhte die eine Gelenkhälfte auf einem vorstehenden, mit Zementmörtel genau abgeglichenen Absatz des anschließenden Betons.“* Der verbleibende Raum zwischen Gewölbebeton und Gelenk wurde daraufhin mit Zementmörtel ausgestampft [Emperger 1908a, S. 37–38].

Beton auf der Seite mit dem Winkeleisen eingestampft, bevor der Hohlraum um die Stellschrauben mit Feinbeton gefüllt wird [Mörsch 1968, S. 224].

Querkraftabtragung im Gelenk: Vermeidung des Gleitens

Im fertiggestellten Bogen sind insbesondere bei Bewegungen während des Ausrüstens sowie bei einseitiger Belastung Querkräfte im Gelenk abzutragen. Diese Querkräfte müssen sowohl in der Gelenkfläche als auch in der Berührungsfläche zwischen Gelenk und Bogen abgetragen werden. Sicherlich ist die Reibung in der Gelenkfläche der maßgebende Fall, da der Reibwiderstand wesentlich kleiner ist. Der Vollständigkeit halber wird nachfolgend aber auch die Verbindung zwischen Gelenk und Bogen betrachtet.

Der Verbund zwischen Gelenk und Gewölbebeton und damit das Verhindern des Gleitens in dieser Fuge wurde schon durch die weiter oben beschriebenen Maßnahmen zum Fixieren des Gelenkes (Einbetonieren der Gelenkteile, Steinschrauben usw.) bewirkt. Eine weitere, zusätzliche Maßnahme kann man am Gelenk der Prinzregentenbrücke in Berlin erkennen (1907; Abbildung 7.67). Die Rückseiten der Gelenkstühle wurden hier mit Flanschen versehen, um den Verbund mit dem Beton zu verbessern. Dabei wurden die oberen Flansche kürzer gehalten, um das Einstampfen zu erleichtern.⁶⁹³ Durchsetzen konnten sich solche Rippen allerdings nicht. Mörsch empfahl, sie wegzulassen, da sie das Stampfen behindern und wegen ihrer trapezförmigen Querschnitte sogar spaltende Wirkung auf den Gewölbebeton haben. Die in der Fuge Gelenkstuhl–Bogen auftretende Reibung genüge, um die auftretenden Querkräfte mit voller Sicherheit zu übertragen [Mörsch 1968, S. 224].

Ein Ausnahmefall ist das Bleigelenk: Hier gibt es bauartbedingt ausschließlich den Fall der Berührung zwischen Gelenk und Bogen. Zumeist war hier die Reibung ausreichend [Kollmar 1919, S. 40].⁶⁹⁴ Nur in wenigen Fällen sind zusätzliche Sicherungen bekannt, wie beispielsweise bei der Neißbrücke in Rothenburg/Oberlausitz [Melan 1911, S. 206]. Hier wurden im Abstand von 20 cm Rundstäbe kreuzweise einbetoniert, um ein Abgleiten zu verhindern. Des Weiteren beschreibt Mörsch je Bleiplatte zwei senkrecht eingelassene Stabeisen, allerdings empfiehlt er deren Einsatz lediglich *„falls es die besonderen Verhältnisse als angezeigt erscheinen lassen.“* [Mörsch 1968, S. 211].⁶⁹⁵

Ein Beispiel, wo es dennoch zum Gleiten eines Bleigelenkes⁶⁹⁶ kam, ist der Wettbachviadukt der Heubergbahn⁶⁹⁷ zwischen Spaichingen und Reichenbach in Baden-

⁶⁹³ „Um eine sichere Übertragung der Querkräfte durch die Gelenkkörper auf das Eisenbetongewölbe zu bewerkstelligen, sind die Körper oben und unten mit flanschartig vortretenden Rändern versehen. Der obere Rand ist schmaler gehalten, um das Einstampfen nicht zu behindern (...).“ [Emperger 1911, S. 406].

⁶⁹⁴ Z. B. auch bei Mörsch: „Zur Aufnahme der Querkräfte hat man bei den Bleigelenken meist keine besonderen Maßnahmen für nötig gehalten.“ [Mörsch 1968, S. 211].

⁶⁹⁵ Weiteres Beispiel: einbetonierte Flacheisen bei der Königsbrücke in Düsseldorf (vermutlich die heutige Girardet-Brücke) [Melan 1911, S. 206].

⁶⁹⁶ Relevante Archivalien konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgetan werden, so dass nicht gesichert feststeht, ob es sich um Rutschen oder Gleiten handelt. Die besonderen geologischen Verhältnisse legen die Vermutung nahe, dass das Scheitелgelenk ins Gleiten kam, als einer der Pfeiler nachgab.

Württemberg. Der Bau begann 1913, die geplante Eröffnung verschob sich aufgrund des ersten Weltkrieges sowie immenser bautechnischer Probleme von 1915 auf 1928. Die Pfeiler des Wettbachviadukts rutschten aufgrund der schwierigen geologischen Verhältnisse am Albtrauf wiederholt ab, bis heute sind die Schäden an den Pfeilern sichtbar (Abbildung 7.68b). Daraus resultierend bewegte sich natürlich auch der Bogen, die Folge war das Abgleiten des Bleigelenks (Abbildung 7.68a).

In der Praxis wesentlich relevanter als das Gleiten in der Fuge Gelenk–Beton war die Betrachtung der Berührungsfuge im Gelenk. Während es bei den Stein- und Betongelenken noch eine höhere Reibung gab, traten bei den eisernen Wälzgelenken Probleme auf. Das bekannteste Beispiel hierfür ist die Maximiliansbrücke in München, 1904.⁶⁹⁸

Die Brücke bestand aus zwei Bogen mit je 44 m Stützweite. Beide Bogen waren als Dreigelenkbogen mit Wälzgelenken ausgeführt. Zwei Wochen nach dem Absenken des Gerüsts ereignete sich ein fataler Unfall.⁶⁹⁹ Nachdem am Morgen ein ausgeführtes Nivellement noch ein absolut unauffälliges Ergebnis des westlichen Bogens, allerdings ein Steigen des östlichen Bogenscheitels gezeigt hatte, vergrößerte sich die Verformung im Laufe des Tages weiter bis der Ostbogen komplett aus den Gelenken glitt. Durch den Stoß wurde auch der Westbogen zum Gleiten gebracht: An allen vier Kämpfern glitten die Bogen komplett aus den Gelenken. Beide Bogen verkanteten sich im Bereich der Kämpferfugen,⁷⁰⁰ so dass die Bogen nicht abstürzten. Ein Teil der Werksteine konnte deshalb wiederverwendet werden, Menschen kamen nicht zu Schaden. Dennoch: Beide Brückenbogen mussten neu erbaut werden [Dietz 1904].

Der Unfall entfachte in Fachkreisen eine lebhafte Diskussion um die Ursache. Die Verunsicherung bezüglich der Verwendung von Wälzgelenken ist auch durchaus nachvollziehbar: Das Versagen einer Brücke wie im beschriebenen Fall war nicht nur ein finanzielles Desaster, es konnte auch Menschenleben gefährden und damit den zuständigen Bauingenieur in eine äußerst prekäre Lage bringen. Der Ruf nach Aufklärung wurde umgehend laut.⁷⁰¹ Der Münchner Oberbaurat Hensel, der sich den Schaden sicherlich persönlich angesehen hatte, spekulierte zu den Ursachen, dass wohl ein hoher Temperaturanstieg kurz vor dem Einsturz zum Gleiten geführt habe. Diese Meinung bestätigte sich zwar nicht, allerdings bekräftigte die Redaktion der Deutschen Bauzeitung

⁶⁹⁷ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü11.

⁶⁹⁸ Zum Phänomen des Gleitens siehe auch das Fallbeispiel der Illerbrücke Lautrach im Kapitel 8.4.

⁶⁹⁹ [Dietz 1904] liefert zum Unfall eine minutiöse Beschreibung.

⁷⁰⁰ Beim östlichen Bogen war zusätzlich noch das Lehrgerüst in abgesenkter Stellung vorhanden, so dass der Bogen trotz Verkanten der Kämpfer auf das Lehrgerüst fiel.

⁷⁰¹ Vgl. „Dieses eigenartige Vorkommnis muß das Interesse der Fachwelt im höchsten Maße erwecken und es als wünschenswert erscheinen lassen, daß der Fall nach allen Richtungen auf das eingehendste untersucht und der Kritik unterzogen wird. Ich möchte wünschen, daß eine eigens zu diesem Zweck berufene Kommission bestehend aus hervorragenden Praktikern und Theoretikern des Baues moderner steinerner und Betonbrücken zur Prüfung des Falles gebildet würde, deren Urteil dann den Fachkreisen zugänglich zu machen wäre. Denn es kann keinem Zweifel unterliegen, daß die klare Darlegung der Ursachen des merkwürdigen Falles für die weitere Entwicklung dieses Zweiges der Ingenieur-Wissenschaft von der größten Bedeutung ist.“ [Hensel 1904, S. 340].

in einem Kommentar, dass die Aufklärung des Unfalles geboten sei. Es sei festzustellen, ob Ausführungsfehler ursächlich seien „*oder ob schließlich derartige Gelenk-Konstruktionen, denen in Fachkreisen ja vielfach mit Mißtrauen begegnet wird, überhaupt bedenklich erscheinen.*“ [Hensel 1904, S. 342].

Nachprüfungen durch den hinzugezogenen Gutachter, Prof. Wilhelm Dietz⁷⁰² von der Technischen Hochschule in München ergaben, dass die Brücke einschließlich der Gelenke vollständig richtig bemessen, die Baustoffe von bester Beschaffenheit und das Mauerwerk sowohl in Beschaffenheit als auch in der Ausführung ausnahmslos gut waren. Die Beanspruchungen seien zwar teilweise erheblich, jedoch nirgends über die zulässigen Grenzen hinausgehend. Die gleichen Gelenke seien bei der Reichenbach- und der Corneliusbrücke verwendet worden, ohne dort zu irgendwelchen Schäden geführt zu haben. Durch das spätere Einbetonieren hätte dann das Bauwerk nach der Ansicht des Gutachters Dietz „*den erforderlichen Sicherheitsgrad auch für alle Ausnahmefälle erlangt.*“ [N. N. 1904d, S. 423]. Als Auslöser für das Gleiten wurde schließlich die Ausbildung der Gelenke ausgemacht. Dabei gab es zwei Komponenten, die im Zusammenspiel letztlich das Versagen verschuldeten: zum einen die konstruktive Ausbildung der Gelenke und zum anderen die Verwendung des Schmiermittels Stearin.

Die konstruktive Ausbildung der Gelenke erfolgte in der Weise, dass die Krümmungsradien in der Wälzfläche sehr groß waren. Dadurch konnte der konkave Teil keine Querkräfte übertragen. Mörsch berichtete in seinem 1905 in der Schweizer Bauzeitung erschienenen Artikel zur Maximiliansbrücke, dass die Krümmung des konkaven Gelenkstückes so flach gewesen sei, dass als einzige Sicherung gegen das Gleiten nur der Reibungswiderstand gewirkt habe [Mörsch 1905, S. 236]. Zusätzliche Vorkehrungen gegen das Gleiten waren in den Gelenken nicht getroffen worden [N. N. 1904d, S. 423]. Die Untersuchungen ergaben jedoch, dass die konstruktive Ausbildung alleine noch nicht zum Versagen geführt hätte: „*Hr. Prof. Dietz hält zwar eine solche Sicherheitsvorkehrung, um allen unvorhergesehenen Möglichkeiten vorzubeugen, an und für sich für erforderlich, ist aber der Anschauung, daß, bei gewöhnlichen Reibungsverhältnissen ein Abgleiten in den Gelenken nicht eingetreten wäre.*“ [N. N. 1904d, S. 423].

Verhängnisvoll jedoch war die Verwendung von Stearin zum Schutz der Gelenke gegen Korrosion. Nach Dietz hatte man die Gelenke vor dem Einbau „*blank geputzt und mit Stearin geschmiert.*“ [Dietz 1904, S. 1410]. Wenn an dieser Stelle noch von Schmierung gesprochen wird, so gibt es mehrere Stimmen, die aussagten, dass das Stearin nicht zum Schmieren, sondern zur Erhöhung des Korrosionsschutzes vorgesehen war.⁷⁰³ Wie dem auch sei, das eingesetzte Mittel verringerte den Reibungswiderstand in drastischer Weise. Untersuchungen zur Reibung in Zapfgelenken hatte August Föppl im Jahr 1901 im

⁷⁰² Nach eigenen Angaben [s. Dietz 1904] wurde Dietz nur wenige Stunden nach dem Unfall „amtlich an die Baustelle berufen“. Sein erster Verdacht sei gewesen, dass die Gelenke geschmiert worden seien, dies wurde jedoch verneint. Daraufhin rechnete Dietz das Bauwerk nochmals unter Einbeziehung der am Bau genommenen Maße nach: „Hierbei wurde sorgfältigst allen tatsächlich bestehenden Verhältnissen Rechnung getragen, insbesondere auch jene Pfeilverhältnisse (...), welche nach den Nivellements beide Bogen am Tage der Katastrophe aufwiesen, in die analytisch durchgeführte Rechnung eingesetzt.“ [Dietz 1904, S. 1409].

⁷⁰³ Vgl. z. B. [N. N. 1904d, S. 424], [Mörsch 1905, S. 237].

Centralblatt der Bauverwaltung publiziert. Dabei verglich er verschiedene Schmiermittel und deren Auswirkung auf den Reibungswiderstand, der ja bei Zapfengelenken⁷⁰⁴ möglichst klein sein soll. Er stellte fest: *„Als geeignete Schmiermittel für hochbelastete Gelenke (...) sind Stoffe wie Wachs, Talg, Stearin, Paraffin zu bezeichnen, die unter gewöhnlichen Umständen kaum als Schmiermittel anzusehen sind.“* [Föppl 1901, S. 197]. Der Reibungskoeffizient Stahl auf Stahl sank bei den Versuchen von 0,216 beim ungeschmierten Zapfen bis auf 0,0046 bei der Verwendung von Stearin, also beinahe gegen Null [Föppl 1901, S. 197]. Aufgrund des Einsatzes von Stearin wurde bei der Maximiliansbrücke nun also nicht mehr die notwendige Reibung im Gelenk aufgebracht: Durch das höchst unglücklich gewählte Korrosionsschutzmittel habe man einen Zustand des labilen Gleichgewichts geschaffen, der durch kleinste Einflüsse gestört werden könne und zum Einsturz führte [Dietz 1904, S. 1410]. Diese Störung des labilen Gleichgewichts erfolgte dann beim Aufmauern auf den östlichen Bogen und das Gleiten kam in Gang. Zu den Schäden an der Brücke bemerkte Dietz sehr pragmatisch: *„Der eben besprochene Bauunfall kann als zwar unfreiwilliger, aber im größten Stil durchgeführter ergänzender Versuch über die Stoßwirkung auf Gewölbobogen aufgefaßt werden und stellt als solcher sorgfältig aus gutem Baustoff ausgeführten Quaderbogen das beste Zeugnis für ihr elastisches Verhalten auch bei dieser Beanspruchungsweise aus.“* [Dietz 1904, S. 1411]. Zum Wiederaufbau konnte dann auch ein bedeutender Teil der Steine wiederverwendet werden.⁷⁰⁵

Von der grundsätzlichen Verwendung von Wälz Gelenken wurde in den Gutachten zur Maximiliansbrücke in keiner Weise abgeraten, es wurde jedoch dringendst empfohlen, zusätzliche Vorkehrungen gegen das Gleiten zu treffen: *„Von allen ähnlichen Zwecken dienenden Gelenkkonstruktionen sind die Wälz Gelenke wohl die wirksamsten und dabei sehr einfach auszuführen. Eine Sicherung gegen Gleiten müssen sie jedoch besitzen. Das nachträgliche Ausbetonieren der Gelenkfugen bleibt immerhin nur ein Aushilfsmittel, das allerdings hier bei den geringen Querkräften den beabsichtigten Zweck genügend erfüllt hätte; jedenfalls bietet es aber nicht einen zahlenmäßig nachweisbaren Sicherheitsgrad, den z. B. die Anordnung der Kupillen gewährt.“* [Dietz 1904, S. 1410–1411].

⁷⁰⁴ Vgl. Kap. 7.5.7.

⁷⁰⁵ In der Schweizer Bauzeitung wurde behauptet, dass das Gewölbe in der nach dem Abgleiten vorhandenen Lage lediglich gesichert und weiterverwendet wurde: *„Auf Grund eines Sachverständigen-Gutachtens sollen die von den Kämpfer-Gelenken abgeglittenen Gewölbe der Maximiliansbrücke nicht abgetragen werden. Da Konstruktion und Material durch die Senkung verhältnismässig geringen Schaden genommen, beantragen die Sachverständigen, den Bau so bestehen zu lassen und nur die Gelenke besonders zu sichern.“* [N. N. 1904b, S. 285]. Eine ähnlich lautende Meldung erschien in der Allgäuer Zeitung vom 7.7.1904: *„(Die gefährdete Maximiliansbrücke) braucht nach dem technischen Befunde nicht abgetragen zu werden. Der Magistrat hat an die Firma Sager & Woerner den Auftrag gegeben, die Ausbesserung der eingetretenen Schäden vorzunehmen.“* [N. N. 1904g]. Am Wahrheitsgehalt dieser Aussagen muss insofern gezweifelt werden, als insbesondere Mörsch den Zustand der Bogen nach dem Unfall als wenig stabil bezeichnete und Sicherungsmaßnahmen wie das Vermörteln der Kämpfergelenke vor den weiteren Rekonstruktionsmaßnahmen beschrieb [Mörsch 1905, S. 237]. Im selben Artikel steht zu lesen, dass grundsätzlich zwei Lösungen zum weiteren Umgang in Betracht kommen: *„entweder vollständiger Abbruch und Neuherstellung oder Heben der Gewölbe und Ausbessern der beschädigten Stellen. Man entschied sich für das letztere.“* [Mörsch 1905, S. 237]. Die Verfasserin bezweifelt den Wahrheitsgehalt dieser Aussage.

Zur Vermeidung des Gleitens in der Berührungsfuge der Wälzgelenke gab es verschiedene Möglichkeiten, die gebräuchlichsten werden nachfolgend beschrieben (Abbildung 7.69).

Dollen/Kupillen/Rundeisenstifte: Diese bestehen aus senkrecht in die Gelenkfläche eingelassenen Eisenzylindern, die auf Scherung beansprucht werden. Übernommen aus dem Eisenbau,⁷⁰⁶ wurden diese bereits von Emil Winkler auch für den Einsatz in Steingelenken im Jahre 1880 vorgeschlagen:⁷⁰⁷ Da bei der Verwendung permanenter Gelenke die Vermörtelung nicht angebracht sei, „*könnte man ein Verschieben durch eiserne Dübel verhüten.*“ [Winkler 1879; 1880, S. 59]. Beim Wiederaufbau der Maximiliansbrücke in München wurden die Wälzgelenke mit solchen Dollen versehen, um ein erneutes Gleiten zu verhindern [Mörsch 1905, S. 239], ebenso die unmittelbar folgenden weiteren Isarbrückenbauten in München sowie die Wallstraßenbrücke in Ulm (1904–1905, zerstört). Abscherdollen wurden oft einseitig konisch zugespitzt beziehungsweise etwas kleiner als das Dollenloch ausgeführt, um die Drehung des Gelenks zu erleichtern (Abbildung 7.70).

Knaggen/Nasen: Ober- und unterhalb der Wälzfläche am konvex gekrümmten Lagerteil angebracht fixierten sie die beiden Gelenkteile in Querrichtung gegeneinander (Abbildung 7.69). Diese Knaggen sicherten sicherlich auch gegen Rutschen, Mörsch beschreibt jedoch explizit die Verwendung zur Aufnahme von Querkräften: „*Zur weiteren Sicherheit gegen die Querkräfte sind außer den Dollen noch nasenartige Vorsprünge am konvexen Gelenkstück angezeigt*“ [Mörsch 1905, S. 224].

Schüsselhafte Ausführung des konkaven Teils: Als weiteren Schutz gegen das Gleiten benennt Mörsch die Krümmung des konkaven Teils: „*Einen weiteren Schutz gegen das Abrutschen des konvexen Gelenkteils bietet eine ordentliche Krümmung, d. h. schüsselförmige Gestalt des konkaven Teils.*“ [Mörsch 1968, S. 226]. In der weiteren Literatur (z. B. im Zusammenhang mit dem Bauunfall an der Maximiliansbrücke, s. o.) wird lediglich in umgekehrter Weise berichtet, dass eine zu flache Krümmung negative Auswirkungen habe.⁷⁰⁸

Letztlich führte die Angst vor dem Gleiten des Gelenks spätestens nach dem Bauunfall an der Maximiliansbrücke dazu, dass Wälzgelenke obligatorisch mit einer oder mehreren der vorgenannten Sicherungsvorrichtungen ausgestattet wurden. Abbildung 7.70 zeigt das Gelenk einer Brücke in Heidelberg, bei der Schraubenbolzen, Dollen, Knaggen und einbetonierte Winkeleisen verwendet wurden. Vergleichbare Ausführungen sind nach der Jahrhundertwende von diversen Brücken bekannt, beispielhaft seien hier der Igelsbach- und der Laufenmühleviadukt⁷⁰⁹ der Wieslaufalbahn zwischen Rudersberg und Welzheim

⁷⁰⁶ Vgl. Dietz im Rahmen seiner Betrachtungen zum Gelenkgleiten bei der Maximiliansbrücke: „Die oft sehr erheblichen Bremswirkungen der Bahnzüge sowie die Stoßwirkungen heftiger Stürme werden bei den meisten bayerischen Brücken seit fast 5 Jahrzehnten in der in Fig. 12 dargestellten Weise durch die Kupillen S aufgenommen.“ [Dietz 1904, S. 1410].

⁷⁰⁷ Vgl. Kap. 7.1.

⁷⁰⁸ Vgl. auch Fußnote 818.

⁷⁰⁹ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü28 und Ba-Wü26.

(1908–1909, Abbildung 7.64), die Neckarbrücke Tübingen (1910, [Fatio 1911, S. 244], Abbildung 7.71) und die Rosensteinbrücke in Stuttgart-Bad Cannstatt genannt (1914, [Siegrist 1914, S. 179]).

An der grundsätzlichen Verwendung der Wälzelenke wurde weiterhin festgehalten, die Sicherheit gegen Gleiten war mit den zusätzlichen Vorkehrungen, insbesondere mit dem Einsatz von Dollen ausreichend: *„Wenn also, wie jetzt allgemein üblich, die gesamte Querkraft durch die Scherfestigkeit der eingesetzten Dollen übertragen wird und diese reichlich bemessen werden, so ist ein Abgleiten des Gewölbes nicht zu befürchten. Tatsächlich ist seither auch nie mehr etwas Ähnliches bekanntgeworden.“* [Mörsch 1968, S. 226].

7.5.7 Zapfengelenke⁷¹⁰

Zapfengelenke bestehen aus gusseisernen oder stählernen Stühlen, die mit je einer halbkreisförmigen Schale den Zapfen aus Stahl umgreifen [Emperger 1911, S. 405]. Erstmals eingesetzt wurden Zapfengelenke in einem massiven Gewölbe bei der Donaubrücke in Inzigkofen im Jahr 1895 durch Max Leibbrand [Leibbrand 1895/96]. Aus Anlass seines Brückenbaus in Neckarhausen (1900, zerstört) beschrieb er die Gelenkethematik einschließlich der Vor- und Nachteile nochmals ausführlich. Er habe dort wie bei der Brücke in Inzigkofen Zapfengelenke verwendet, *„da diese im Vergleich zu anderen Gelenkanordnungen billig, bequem zu versetzen und sicher wirkend sind.“* [Leibbrand 1903, S. 459]. Stein- oder Betongelenke seien nicht anwendbar gewesen, da die Druckspannungen zu hoch und damit die Berührungsflächen zu groß gewesen wären. Auch sei selbst bei sorgfältigster Bearbeitung dieser Flächen eine Gewähr für Übertragung der Kräfte nicht vorhanden. Das Versetzen der großen Stücke, welches besondere Rüstungen erfordert hätte, wäre ebenso teuer und schwierig geworden wie auch die Beschaffung von Gestein in der benötigten Festigkeit [Leibbrand 1903, S. 459]. Wenn auch Wälzelenke *„einen sehr geringen Widerstand gegen Drehung leisten, so ist deren genaues Versetzen und Anpassen an die Wölbsteine derart mit Schwierigkeiten verknüpft, daß auch wenig Gewähr für eine der Rechnung entsprechende Wirkung gegeben ist, außerdem werden diese Gelenke bei den hohen Stahlpreisen ebenfalls sehr teuer.“* [Leibbrand 1903, S. 459]. Weiterhin sei er in der Wahl der Zapfengelenke durch von ihm veranlasste Versuche mit solchen Gelenken in der Materialprüfanstalt in München bestätigt worden [Leibbrand 1903, S. 459].

Die angesprochenen Versuche waren dem Misstrauen bezüglich des Reibungswiderstandes zwischen Zapfen und Stühlen geschuldet. Der Mannheimer Regierungsbaumeister Probst schreibt in seinem Artikel zu den Gelenken in massiven Bogenbrücken: *„Es entsteht aber die Frage, ob bei der großen spez. Pressung der Zapfen eine Drehung noch stattfinden kann und zutreffenden Falls: wie groß der Einfluss dieser*

⁷¹⁰ In der Literatur auch Bolzengelenk [z. B. Büsing 1905, S. 461, Schaechterle 1912, S. 93, Mörsch 1924, S. 156, usw.]. Bezug nehmend u. a. auf das Handbuch für Eisenbetonbau [Emperger 1911, S. 405 und Emperger 1932, S. 219] und [Melan 1911, S. 217] als zwei der Standardwerke für den Massivbrückenbau verwendet die Verfasserin den Begriff Zapfengelenk. Der Begriff Bolzen bleibt auf diese Weise dem temporären Verbindungselement zwischen den Gelenkstühlen vorbehalten (vgl. Kap. 7.5.6). Dies ermöglicht eine saubere Trennung zwischen den Bezeichnungen Bolzen und Zapfen.

Reibungswiderstände auf die Beanspruchung der einzelnen Gewölbequerschnitte ist?“ [Probst 1899, S. 546]. Weiterhin behauptet er, dass bei wachsender Belastung die Reibungszahl zunehme bis hin zur Zerstörung der Oberflächenhaut der Zylinderwandungen [Probst 1899, S. 546]. Gilbrin stellte hingegen die Frage nach der Dauerhaftigkeit der Drehfunktion. Es liegen keine genügenden Erfahrungen darüber vor, wie sich die Gelenkflächen auf Dauer verhalten. Wahrscheinlich nehme die Schicht der Schmierung immer mehr ab und es setze sich Schmutz auf dem Bolzen fest, so dass die Reibung im Laufe der Zeit zunehmen müsse [Gilbrin 1913, S. 42–43].

Die von Max Leibbrand veranlassten Versuche in der Materialprüfanstalt in München ergaben, dass übliche Schmiermittel wie Öle oder Fette den hohen Pressungen nicht gewachsen waren und ausgedrückt wurden. Ein Nachschmieren sei bauartbedingt nicht möglich. August Föppl, der die Versuche leitete, testete deshalb Stoffe wie Wachs, Talg, Stearin, Paraffin usw. [Föppl 1901, S. 197],⁷¹¹ denen eine höhere Dauerhaftigkeit als Ölen und Fetten zugesprochen wurde.

Die Zusammenfassung der Versuche von Föppl und die daraus resultierenden Empfehlungen für Zapfengelenke in der Praxis gab wiederum Leibbrand: „1. Die Reibungszahl nimmt mit zunehmendem Druck in erheblichem Maße ab. Kleine Bolzendurchmesser sind also vorzuziehen. 2. Eine dünne Haut des Schmierfettes verbleibt auch bei hohem Druck zwischen Stuhl und Bolzen. Es wird also eine dauernde Schmierung erhalten. 3. Paraffin ist weitaus das günstigste Schmierfett für solche Gelenke, da für dieses Fett die Reibungszahl sehr klein ist und bei einer Zunahme der Pressung von 100 kg/qcm bis 600 kg/qcm auf die Querschnittsfläche des Bolzens von 0,0062 auf 0,0025 sinkt. 4. Auch bei ungeschmierten Bolzen ist die Reibungszahl eine mäßig große.“ [Leibbrand 1903, S. 459–460]. Die Wirksamkeit von Zapfengelenken sei deshalb außer Frage.

Der Vorteil des Zapfengelenkes war die Fähigkeit des Gelenkes, ohne Zusatzmaßnahmen Querkräfte übertragen zu können. Dadurch war das genaue Versetzen in der Achse zwar unumgänglich, in der Neigung jedoch war das Zapfengelenk – im Gegensatz zu den anderen Gelenkarten – relativ unempfindlich. Auch die Angst vor dem Unwirksamwerden des Gelenkes mit der Zeit bestätigte sich nur bedingt: Durch die Schalen war ein guter Schutz gegen Schmutzeintrag in die Drehfuge gegeben [Mörsch 1968, S. 219–220]. Auch durch die eventuell nachlassende Funktion entstehende Nebenspannungen seien vertretbar, da sich die Bewegungen im Bogen mit der Zeit verringern und die Materialfestigkeit zunehme [Föppl 1901, S. 197].⁷¹²

⁷¹¹ Vgl. auch Kap. 7.5.6 zum Unfall der Maximiliansbrücke, München.

⁷¹² Vgl. „Die Schmierschichten, um die es sich hier handelt, dürften sich zwar bei den geringen Bewegungen, die in den Gelenken von Tragwerken vorkommen, auf lange Zeit hinaus ziemlich unverändert erhalten; man muss aber wohl annehmen, dass sie nach dem Verlaufe längerer Zeiten schliesslich unwirksam werden. Dagegen kommt es oft genug vor, dass eine möglichst reibungsfreie Beweglichkeit des Gelenks nur für eine beschränkte Zeitdauer von Wichtigkeit ist, so namentlich bei den Gelenken, die man neuerdings in grössere Brückengewölbe aus Mauerwerk oder Beton einzuschalten pflegt. Merkliche Bewegungen infolge des Setzens im Mauerwerk und infolge der Nachgiebigkeit des Baugrundes sind hier vorwiegend in den ersten Zeiten nach der Beendigung des Baues zu erwarten. Nachdem diese ersten, grösseren Formänderungen einmal abgelaufen sind, schadet ein allmähliches Nachlassen in der Beweglichkeit des Gelenks um so weniger, als die Festigkeit

Ausgeführte Beispiele mit Zapfengelenken:

Frühe Beispiele erhaltener Zapfengelenke sind die Prinzregentenbrücke sowie die Max-Joseph-Brücke über die Isar in München (beide 1901–1902). Bei beiden Brücken sind die Gelenke verdeckt. Das unverdeckte Gelenk im Bauzustand der Prinzregentenbrücke zeigt die Abbildung 7.63.

Ungeplanterweise sichtbar ist das Zapfengelenk der Prinzregentenbrücke in Berlin-Wilmersdorf,⁷¹³ 1907. Die wohl erste Brücke in Eisenbetonbauweise im Auftrag der preußischen Staatseisenbahnverwaltung [Emperger 1911, S. 538] wurde als Dreigelenkbogen mit einer Stützweite von 24,4 m ausgeführt. Das ursprünglich ebenso wie bei den Münchener Brücken verdeckte Scheitel-Zapfengelenk ist heute zu sehen, weil der Schmuckstein abbrach (Abbildung 7.67 sowie Abbildung 7.72). Die Gelenke bestehen hier aus Gußeisen, die Zapfen mit einem Durchmesser von 8 cm bestehen aus Stahl. Die Schalenkörper haben eine Dicke von 5 cm [Emperger 1911, S. 406].

Ein weiteres, ebenfalls sehr eindrucksvolles Beispiel ist die ehemalige Eisenbahnbrücke über den Regen in Blaibach⁷¹⁴ mit einer Stützweite von 70 m. Die in den Jahren 1927–1928 erstellte Brücke ist zwar wesentlich später erbaut als die bisher genannten, jedoch ist das Gelenk wie bei der Brücke von Inzigkofen von Anfang an offen geplant und ausgeführt worden.⁷¹⁵ Die Gelenke sind ober- wie unterseitig zugänglich (Abbildung 7.73) und bestehen aus Gussstahl. In der Untersicht kann man erkennen, dass die einzelnen Gelenke mit Abstand verlegt wurden. Ebenso kann man den Zapfen sowie die geschlossene Schale mit den kleinen Fugen, die die Drehung erlauben, sehen.

7.5.8 Federgelenke Bauart Mesnager⁷¹⁶

Erstmals veröffentlichte Augustin Mesnager einen Artikel über seine Federgelenke⁷¹⁷ in den „*Annales des ponts et chaussées*“ [Mesnager 1907]. Hierin beschrieb er eine Gelenkanordnung, die er anlehnend an seinen Vorschlag aus dem Eisenbau⁷¹⁸ in einer Testreihe im Jahr 1906 untersucht hatte. Dabei handelte es sich um den reduzierten Bereich eines quadratischen Querschnitts, in dem Stabstahl kreuzweise verlegt wurde (Abbildung 7.74). Die Versuche verliefen durchaus positiv, die Zusammenfassung

des Wölbogens mit fortschreitender Erhärtung des Mörtels wächst, sodass das Gewölbe späterhin auch die durch die grössere Gelenkreibung herbeigeführten Zusatzspannungen ohne Schaden aufzunehmen vermag.“ [Föpl 1901, S. 197].

⁷¹³ Beschreibung im Katalog unter D2.

⁷¹⁴ Beschreibung im Katalog unter BY1.

⁷¹⁵ Ausführliche Beschreibung in [Emperger 1932, S. 345–353].

⁷¹⁶ Die in den folgenden zwei Kapiteln 7.5.8 und 7.5.9 dargestellten Gelenkarten (Feder- und Betongelenke) gehören streng genommen nicht in den Rahmen dieser Dissertation, da diese ausschließlich bei bewehrten Brückenbogen Anwendung fanden. Da sie aber chronologisch in den Untersuchungszeitraum fallen und da auch im Rahmen der zum Kapitel 7.4 erfolgten Recherchen zahlreiche Quellen erarbeitet wurden, werden diese beiden Gelenkarten hier besprochen, wenngleich die hiesige Abhandlung keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

⁷¹⁷ Französisch semi-articulation, in Deutschland setzte sich der Begriff Federgelenk und nicht die wörtliche Übersetzung Halbgelenk durch.

⁷¹⁸ Vgl. [Mesnager 1896].

Mesnagers lautete: „*Federgelenke scheinen für Eisenbeton- wie auch für Mauerwerksbogen ausführbar, wenn man die nachfolgenden Bedingungen einhält. Der verjüngte Bereich des Betons, dessen Dicke zumindest der Länge entsprechen soll, wird von Stäben gekreuzt, deren Abstand gleich groß ist wie der größte Ausschlag der Resultierenden unter den Verformungen aus der Last.*“⁷¹⁹ [Mesnager 1907, S. 197].

Die Gelenkwirkung beruht dabei auf der Biegsamkeit der Eiseneinlagen, die sich in der gedachten Gelenkachse kreuzen. Trotzdem bieten die Eiseneinlagen einen gewissen Widerstand gegen die Drehung. Im Handbuch für Eisenbetonbau wird deshalb die Gelenkwirkung als „*unvollkommen*“ bezeichnet; daher rührt auch die französische Bezeichnung „*semi-articulation*“, also Halbgelenk [Emperger 1932, S. 223].

Eingebaut wurden solche Gelenke erstmals bei der Überwölbung des Kanals St. Martin in Paris, 1907–1908. Der zuständige Ingenieur, Simon Boussiron, änderte den Vorschlag von Mesnager jedoch dahingehend ab, dass die gekreuzten Stäbe in vier Ebenen (Abbildung 7.75) – und nicht wie bei Mesnager lediglich in zweien – in den anliegenden Beton eingriffen, um die zu übertragenden Kräfte auf einen größeren Bereich des Bogenquerschnitts zu verteilen [Mesnager 1910a, S. 245]. Weitere sehr bekannte frühe Brücken mit Mesnager-Gelenken waren die Brücken von Amélie-les-Bains⁷²⁰ (1909–1910) und der nachfolgend behandelte Pont Neuf in Montauban.

Ausgeführte Beispiele mit Federgelenken:

Ein sehr schönes Beispiel für frühe Mesnager-Gelenke ist der Pont Neuf⁷²¹ über den Tarn in Montauban von 1911–1913.⁷²² Mesnagers Beschreibung zu dieser Brücke lautet: „*Es handelt sich um eine Brücke mit zwei Bogen mit 53 bzw. 56 m Stützweite. Sie überführt eine Straßenbahnlinie und eine Nebenstraße. Nach mehreren Probelastungen, die vom 3. bis zum 14. Juni 1913 erfolgten, zuerst mittels einer Auflast aus Sand, dann mit einem Straßenbahnwagen und schließlich mit Dampf-Straßenwalzen mit einem Gewicht von 16 Tonnen, wurde die Brücke für den Verkehr freigegeben.*“⁷²³ [Mesnager 1921, S. 183].⁷²⁴ Die Gelenke mit den sich kreuzenden Eiseneinlagen sind in der Abbildung 7.76 dargestellt. Die Kämpfergelenke sind hierbei etwa 6 m eingerückt [Rabut 1916, S. 66]. Auf diese Weise

⁷¹⁹ Original: „Il semble possible de réaliser pour les voûtes en béton armé et même en maçonneries des semi-articulations en béton armé dans les conditions suivantes. La partie amincie du béton ayant une épaisseur au plus égale à sa longueur, est traversée par des barres inclinées dont l'ouverture est égale à la plus grande oscillation de la résultante sous les déplacements des surcharges.“

⁷²⁰ Ausführliche Beschreibung dieser Brücke in [Mesnager 1910b].

⁷²¹ Auch unter dem Namen „Pont de Sapiac“ bekannt.

⁷²² Ausführliche Beschreibung der Brücke sowie der Gelenke in [Rabut 1916]; Beschreibung im Katalog unter I13.

⁷²³ Original: „C'est un pont de deux arches, l'une de 53 mètres, l'autre de 56 mètres de portée. Il donne passage à une ligne de tramways à capteur et à un chemin vicinal. Il a été livré à la circulation après des épreuves faites du 3 au 14 juin 1913, d'abord avec une surcharge de sable, puis avec un train et des rouleaux à vapeur de 16 tonnes.“

⁷²⁴ Mesnager verweist bezüglich dieser Brücke auf einen Artikel im „Génie Civil, 1914“. Die Durchsicht des Jahrgangs blieb ohne Erfolg. Bekannt ist lediglich der 1916 erschienene Artikel von Charles Rabut [Rabut 1916]. Vermutlich hat Mesnager diesen Artikel gemeint und die Jahreszahl falsch angegeben.

erhalten die Widerlager bzw. Pfeiler konsolenartige Bogenteile, durch die sich das Durchflussprofil der Bogen noch vergrößern ließ [Rabut 1916, S. 66]. Die Brücke befindet sich bis heute augenscheinlich in einem guten Zustand (Abbildung 7.77), sie dient mittlerweile ausschließlich dem Straßenverkehr.

7.5.9 Betongelenke Bauart Freyssinet

Ein noch späterer Typ von Gelenken sind die Betongelenke nach Freyssinet. Dieser hatte auch vorher schon Gelenke in Brücken eingebaut, letztlich jedoch erst mit dem Bau der Candelier-Brücke (1921–1922) seinen eigenen Gelenktypus entwickelt [vgl. Freyssinet 1923]. Das Freyssinet-Gelenk verfügt ebenso wie das Mesnager-Gelenk über eine reduzierte Fuge, jedoch fehlte bei Freyssinet die Bewehrung in der Gelenkfuge.

Sicherlich war ein Hauptbeweggrund für die Entwicklung seiner Gelenke die Anwendung des Expansionsverfahrens.⁷²⁵ Erstmals eingesetzt hatte er dieses Verfahren bei der Brücke in Prairéal-sur-Besbre.⁷²⁶ Diese Brücke hatte jedoch noch metallische Gelenke, auch war sicherlich die Ausrüstmethode noch nicht ausgereift.⁷²⁷ Eine sehr ausführliche Beschreibung diesbezüglich liefert das Handbuch für Eisenbetonbau anlässlich der Darstellung des Brückenbaus von Villeneuve-sur-Loire.⁷²⁸ Dazu seien beiderseits der Scheitelfuge bewehrte Schlussstücke von etwa 50 cm Stärke hergestellt worden. Durch Bestreichen des zuerst fertiggestellten Stückes mit Seife verhinderte man das Anhaften des zweiten Schlussstückes. In diesen wurden Nischen ausgespart, in die man die Druckwasserpressen einsetzte. Beim Einlassen des Wassers in die Pressen ergab sich zunächst nur ein Öffnen der Scheitelfuge, später dann auch eine Hebung des Scheitels [Emperger 1932, S. 315]. In die offene Scheitelfuge wurden dünne, stark bewehrte, fett gemischte Eisenbetonplattenstücke von 5 cm Stärke eingelegt, die noch in frischen Mörtel getaucht waren. Dann wurden die Pressen langsam abgelassen, bis diese Platten vollkommen unter Druck standen. Nach dem Ablassen der Pressen betrug die Erweiterung der Scheitelfuge noch 53 mm, die Scheitelhebung 50 mm [Emperger 1932, S. 315]. Die Verlängerung der Bogenachse um 53 mm entsprach in etwa der erwarteten Verkürzung des Bogens aus den Einflüssen der Auflasten und aus dem Schwinden des Materials. *„Auf diese Weise wurden die ungünstigen Spannungen, die sich aus der Deformation des Bogens unter der Last und aus Schwindspannungen ergeben würden, wenn man das Gewölbe in der*

⁷²⁵ Vgl. Kap. 6.2.2.

⁷²⁶ Vgl. [Fernández Ordóñez 2012, S. 32]: „Construit approximativement en 1907, c’est le premier du monde où l’on appliqua le décintrement de l’arc par création directe de poussée à la clef.“ also: „Erbaut ca. 1907, ist dies die erste Brücke der Welt, wo man die Ausrüstmethode der Druckerzeugung im Scheitel anwandte.“

⁷²⁷ „Die Brücke von Prairéal-sur-Besbre ist eine geschichtsträchtige Brücke: dort hat er mit einfachsten Mitteln (...) erstmals das System angewandt, das sich wenig später – nach der Weiterentwicklung und Umwandlung in das Expansionsverfahren – weithin etablierte.“ Original: „Le pont de Prairéal-sur-Besbre est pour cela un pont historique. Là, avec des moyens rudimentaires que l’on transformera et développera plus tard avec le procédé de décintrement par vérins, il invente et utilise pour la première fois un système qui, en peu de temps, deviendra universel.“ [Fernández Ordóñez 2012, S. 32].

⁷²⁸ Beschreibung im Katalog unter I18.

gewöhnlichen Weise durch Senken des Lehrgerüsts ausgerüstet hätte, ausgeschaltet.“ [Emperger 1932, S. 315].⁷²⁹

Den Hauptunterschied zwischen den Federgelenken nach Mesnager und den Betongelenken nach Freyssinet beschrieb derselbe so: „Tatsächlich übersteigt die Druckkraft von Federgelenken in der Praxis kaum 150 t/m, dagegen können sie zur Abtragung von Zugkräften angesetzt werden. Es gibt keine derartige Grenze bei dem System, wie es bei der Candelier-Brücke angewendet wurde. Druckkräfte von mehreren Tausend Tonnen pro m der Gelenkachse können problemlos übertragen werden.“⁷³⁰ [Freyssinet 1923, S. 180]. Weiter seien Federgelenke sperriger und teurer. Den Nachteil der nicht aufnehmbaren Zugkräfte könne man bei seiner Bauart durch Vorspannung der Fuge mittels axialer Spannglieder aufheben [Fernández Ordóñez 2012, S. 45–46].⁷³¹

Ausgeführte Beispiele mit Federgelenken: Ein Betongelenk der Bauart Freyssinet wurde im Rahmen vorliegender Arbeit nicht untersucht.

7.5.10 Sonderformen

In der Literatur gibt es noch einige Sondervorschläge für die Ausbildung von Gelenken. Von den im Folgenden kurz angerissenen Gelenktypen sind der Verfasserin jedoch keine ausgeführten Beispiele bekannt. Es ist lediglich von nicht ausgeführten Ideen auszugehen, keine der angesprochenen Varianten konnte sich in der Praxis durchsetzen. Der Vollständigkeit halber sollen diese trotzdem hier aufgezeigt werden.

⁷²⁹ Vgl. die ausführliche Beschreibung Freyssinets in Zusammenhang mit dem Brückenbau von Le Veudre: „Ces joints étaient garnis à mesure par des empilages de feuillards d’acier, introduits un à un, pour prévenir les conséquences d’une défaillance du système hydrauliques; puis on faisait entre eux un remplissage en mortier maté de tous les vides. Les articulations des retombées étaient formées de grands blocs en béton préfabriqués, en contact par deux surfaces cylindriques à rayons voisins; ces blocs étaient fortement armés en trois directions pour supprimer toute fragilité. Nous arrivâmes à bien exécuter ces articulations, mais avec beaucoup de difficultés et de plus, leur réglage s’avéra des plus délicats. C’est pour éviter ces difficultés que j’eus l’idée d’une simplification de leur exécution. Je pensai qu’en coupant une masse unique frettée par un joint partiel limité aux deux tiers extérieurs de la section, on provoquerait dans le tiers restant, par des flexions alternées, grâce aux déformations permanentes du béton, des fissures ayant à peu près la même loi d’épaisseur que l’espace subsistant entre mes cylindres du Veudre, tangents selon une génératrice. En fait, je n’ai jamais observé de telles fissures, ni au cours des essais ni dans les ouvrages, même pour des angles de flexion plus grands que le centième; le béton se déformant plastiquement sans se fissurer de manière observable. Des essais faits au laboratoire de l’avenue d’Iéna, dans des conditions qui permettaient de faire osciller les articulations, donnèrent de si bons résultats, que j’ai pu employer ces articulations, même pour des clefs où les pressions par cm² dépassaient, en valeur moyenne, 200 kg/cm². Ces articulations, dans lesquelles tous les efforts sont transmis par le béton seul, peuvent être construites pour des puissances quasi illimitées; je les ai utilisées pour tous les ouvrages articulés que j’ai exécutés postérieurement à 1910.“ [Fernández Ordóñez 2012, S. 43–45].

⁷³⁰ Original: „En fait, la limite pratique de puissance des articulations à barres ne dépasse guère 150 t. au mètre linéaire; par contre elles peuvent être utilisées pour transmettre des tensions. Il n’y a pas de limitation analogue pour le système employé au pont Candelier; des pressions de plusieurs milliers de tonnes au mètre linéaire d’axe d’articulation, pourraient être transmises sans difficulté.“

⁷³¹ Original im Zusammenhang: „On les confond parfois avec des articulations Mesnager à barres croisées, qui on sur elles l’avantage de pouvoir travailler indifféremment à la compression et à la traction, mais qui ont des limites de puissance moindres et sont plus encombrantes et plus onéreuses. Toutefois, en soumettant mes articulations à une précontrainte par des câbles axiaux, on peut aussi les rendre capables de travailler en traction.“

Archivalisch belegt ist die geplante Gelenkvariante der Schmiechbrücke in Ehingen: „*Eigentümlich sind die Gelenke im Scheitel und in den Kämpferfugen beschaffen. Sie bestehen nämlich aus gußeisernen je 1,0 m langen, 10 cm breiten und in der Mitte 6 cm starken Stäben von ovalem Querschnitt.*“ [StASIG, Sign. Wü 65/9 T 2–4 Nr. 2072]. Diese ovalen Stangen sollten in die Gelenkfuge eingelegt werden. Weil sich Widerstand gegen diese Planung regte, wurden Versuche mit den Stangen unternommen: In seinem „*Bericht betreffend die Wirkung gewölbter Eiseneinlagen in den Gewölbebeton als Gewölb-Gelenke*“ schrieb Braun von der Befürchtung, dass bei der Verwendung ovaler Eisenstäbe einzelne Betonaussprengungen in der Gelenkfuge stattfinden können [StALB, Sign. E 166 Bü 4298]. Dies habe den überwachenden Beamten dazu veranlasst, Versuche an Beton- und Zementwürfeln mit ebenen und gewölbten Eiseneinlagen im Verhältnis der geplanten Einlagen der Schmiechbrücke durchzuführen. Durch die gewölbte Gelenkeinlage nehme die Bruchfestigkeit um etwa $\frac{1}{9}$ im Vergleich zur ebenen Einlage ab. Der Sicherheitsfaktor dieser Ausführung liege gemäß der Versuche bei mindestens 10 [StALB, Sign. E 166 Bü 4298]. Diese Versuchsergebnisse wurden handschriftlich kommentiert: Es solle nicht unterlassen werden, „*darauf aufmerksam zu machen, daß die behandelten Versuchskörper verhältnismässig klein gewesen sind u. daß deßhalb die gleichförmige Auflage der Eisenkörper auf den Beton wesentlich leichter zu erreichen ist als bei grössern Gelenkstücken*“, wie sie für den realen Brückenbau geplant seien [StALB, Sign. E 166 Bü 4298]. Hinzu käme der Vorteil des Bleis, durch das langsame Ausweichen eine höhere Sicherheit zu gewähren als das Eisen [StALB, Sign. E 166 Bü 4298]. Die Brücke wurde letztlich mit Bleigelenken ausgeführt.⁷³²

Eine ähnliche Ausführung wurde im Protokoll des Vereins Deutscher Portland-Zement-Fabrikanten aus dem Jahr 1894 vorgeschlagen (Abbildung 7.78). Auch hier liegt ein eisernes bzw. stählernes Rohr im Gewölbequerschnitt [Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894, S. 111]. Auch hier ist keine Ausführung bekannt.

Ein weiteres Kuriosum ist das im Jahr 1898 vorgeschlagene „*Doppelgelenk*“ [H. 1898b, S. 600; Abbildung 7.79]. In den Kämpfern werden Gelenke mit zwei Walzen eingesetzt, dadurch werde die Stützlinie entweder zwischen den Gelenkwalzen gehalten oder im Extremfall in einen der beiden Drittelpunkte verschoben. Auf diese Weise könne man den Bogen schlanker ausführen und die Bogenverdickungen seien nicht so stark wie bei „*echten*“ Dreigelenkbogen: „*Auf diese Weise wird man zu Gewölbeformen gelangen, welche von jenen der gewöhnlichen Gewölbe nur wenig abweichen werden.*“ [H. 1898b, S. 600]. 1899 erscheint in derselben Zeitschrift, der Deutschen Bauzeitung, ein Artikel, der dem Vorschlag wenig zuspricht: „*Wenn es auch auf den ersten Blick vielleicht zweckmässig erscheinen könnte, auf diese Weise äusserste Grenzen für die Drucklinien festzulegen, so findet man bei näherer Betrachtung doch, dass der Vorschlag einen Widerspruch in sich schliesst und für die Praxis unannehmbar sein muss.*“ [W. 1899, S. 105]. Die statische Bestimmtheit sei nicht erreichbar, es sei denn im Falle völliger Gleichbelastung beider Walzen. Des Weiteren sei der Vorschlag überhaupt kein Gelenk, weil der Fall nicht vorkomme, dass eine Walze völlig entlastet sei. Zudem fehlen in der Konstruktion die

⁷³² Vgl. Kap. 7.5.2.

eindeutig bestimmte Stützweite sowie der Pfeil. Dies mache eine genaue Berechnung unmöglich [W. 1899, S. 105]. Eine Ausführung ist nicht bekannt.

7.6 Die Bemessung eines Dreigelenkbogens

Die Form von Dreigelenkbogen unterscheidet sich deutlich von der Form eingespannter Bogen. Während der eingespannte Bogen entsprechend der Vergrößerung der Normalkräfte gegen die Kämpfer hin an Stärke zunimmt [Tolkmitt, Laskus 1902, S. 77], so erfordert der Dreigelenkbogen eine Anpassung der Gewölbeform: Dieser erhält in der Mitte der Bogenschenkel eine Verdickung.⁷³³

Erstmals ausgeführt wurde diese Bogenverdickung bei der Donaubrücke in Munderkingen. Karl von Leibbrand ermittelte die Bogenform „auf dem Wege des Versuchs“ [Leibbrand 1894, S. 549]. Dabei passte er die Mittellinie des Bogens der Stützlinie bei Vollbelastung an. Je nachdem die eine oder andere Seite des Bogens nun voll belastet sei, näherte sich die Stützlinie in den Bruchfugen dem äußeren oder inneren Rand. Die Bogenschenkel wurden dann in der Art verdickt, dass bei einseitiger Vollbelastung die auftretenden Beanspruchungen in den beiden Bruchfugen jeweils innen bzw. außen gleich groß und gleich der größten Belastung des Scheitels und des Kämpfers wurden [Leibbrand 1894, S. 550].

Diese Methode, die Maxima bei einseitiger Vollbelastung zu ermitteln, erwies sich als ungenau bei der Bemessung von Dreigelenkbogen.⁷³⁴ Max Leibbrand beschrieb seine beim Entwurf der Inzigkofener Donaubrücke verwendete Methode mittels Belastungsscheiden zur Dimensionierung des Bogens in [Leibbrand 1895/96]. Dabei werde für das Eigengewicht der Brücke und für eine größere Zahl Querschnitte diejenige Lage der Verkehrslast ermittelt, welche für den betreffenden Querschnitt die größte Beanspruchung hervorrufe: Eine auf den Bogen aufgebrachte Einzellast erzeuge in jedem Querschnitt ein Moment. Dabei sei das Moment maximal positiv, wenn die Einzellast direkt darüber angreife, maximal negativ bei Angriff nahe dem Scheitel auf der dem betrachteten Querschnitt abgewandten Seite. Die aus der Einzellast resultierende Auflagerkraft schneide den betreffenden Querschnitt in einem bestimmten Punkt. Wenn dieser Punkt außerhalb des mittleren Drittels liege, erzeuge diese Verkehrslast Zugspannungen [Leibbrand 1895/96, S. 67]. Mit Hilfe dieser Untersuchungen ermittelte

⁷³³ Vgl. Kap. 7.3.

⁷³⁴ Vgl. die Aussage Tolkmitts, die Bemessung mittels Belastungsscheiden ergebe nahezu doppelt so große Werte als bei der Annahme einseitiger Belastung [Tolkmitt, Laskus 1902, S. 78] oder die Aussage des zuständigen Ingenieurs Ferdinand Beutel zur Berechnung der Illerbrücken in Lautrach (vgl. Kap. 8.4) und Kempten: „Zur Berechnung der grössten Beanspruchung in den einzelnen Bogenquerschnitten durch die Verkehrslast konnte das gewöhnliche Verfahren nicht angewendet werden, wonach die eine Bogenhälfte belastet und die andere unbelastet wird und aus der hieraus ermittelten Stützlinie die Gewölbstärken für alle Querschnitte jeder Bogenhälfte berechnet werden. Dieses Verfahren würde nämlich bei den ganz erheblichen Verkehrslasten und der Forderung, mehr als 30 kg/cm² Druckpressung im Bogen zu vermeiden und Zugspannungen überhaupt nicht zuzulassen, viel zu ungenaue Resultate ergeben haben. Es wurde vielmehr, wie dies bei Dreigelenkbogen üblich ist, für jeden massgebenden Querschnitt diejenige Laststellung, die sog. Belastungsscheide, ermittelt, die für diesen Querschnitt die grösste Beanspruchung ergab.“ [Beutel 1903; 1904S, 412].

Leibbrand für jeden Querschnitt das größte positive und negative Moment und erhielt daraus für diese zwei ungünstigsten Belastungsfälle zwei Stützlinien.

Wesentlich greifbarer erläuterte Wilhelm Frank in seinem Buch zur Berechnung von Dreigelenkbogen aus Beton den Grundgedanken hinter den Belastungsscheiden:⁷³⁵ Demnach sei die günstigste Form der Bogenachse nach der Stützlinie für das Eigengewicht der Brücke zu entwickeln. Die Verkehrslast werde dann je nach Größe und Lage Ausschläge in der Stützlinie nach der einen oder anderen Seite verursachen – die ursprünglich rein zentrische Belastung der einzelnen Fugenquerschnitte gehe in eine exzentrische über. Für jede Fuge lassen sich zwei verschiedene Laststellungen ermitteln, für deren eine die obere, für deren andere die untere Kantenpressung ihren Maximalwert erreiche, wobei beide Werte meist nicht gleich groß werden [Frank 1916, S. 2]. Um einen möglichst wirtschaftlichen Entwurf zu erhalten, sei es jedoch am besten, wenn die Maximalwerte der Kantenpressung im oberen und unteren Teil des Querschnitts gleich seien. Man könne dies dadurch erreichen, dass man die Bogenachse geringfügig in die entsprechende Richtung verschiebe. Eine weitere Annäherung lasse sich durch die Fugenlänge, also die Bogenstärke, erreichen: Durch deren Anpassung können die beiden zuvor bereits auf gleiche Höhe gebrachten Werte der Randspannungen auf eine bestimmbare Größe korrigiert werden, die mit der Festigkeit des verwendeten Baumaterials korrespondiere [Frank 1916, S. 2]. Auch Frank empfahl, in keinem Querschnitt des Bogens Zugspannungen zuzulassen, also die Stützlinien im Kernbereich zu halten [Frank 1916, S. 3].

Die Probleme beim graphischen Verfahren lagen immer in einer gewissen Ungenauigkeit. So sei zum einen die Konstruktion in möglichst großem Maßstab aufzuzeichnen, was die Verschiebungen erschwere, zum anderen seien die Zeichenwerkzeuge wie Winkel und Reißschiene für solche Größen zu ungenau [Teichmann 1904, S. 3].⁷³⁶ Neben dem rein rechnerischen Verfahren, bei dem für „jede“ Fuge des Querschnitts die Beanspruchungen berechnet wurden,⁷³⁷ verwendete man noch das graphostatische Verfahren der Einflusslinien: Der Ingenieur Hermann Dewitz führte das Verfahren in seiner Abhandlung vor [Dewitz 1908, S. 32–44]. Dazu konstruierte er jeweils für den Horizontalschub, für die Querkraft wie auch für das Biegemoment eine entsprechende Einflusslinie. Mit deren Hilfe konnte für jede beliebige Fuge des Bogens die zugehörige Beanspruchung ermittelt werden [Dewitz 1908, S. 32–44]. Welches Verfahren angewandt wurde, entschied der verantwortliche Ingenieur: So schrieb beispielsweise Ferdinand Beutel zur Bemessung der Illerbrücken in Lautrach⁷³⁸ und Kempten, er habe stets das doppelte Verfahren

⁷³⁵ Nach einer allgemeinen Erläuterung des Vorgehens ist in diesem Werk auch eine Schritt-für-Schritt-Anleitung des Bemessungsvorganges enthalten einschließlich einer Beispielrechnung für ein reales Objekt, einer Kocherbrücke in Ottendorf, OA Gaildorf in Baden-Württemberg, erbaut 1907/08 (vermutlich nicht mehr vorhanden). Ein weiteres Beispiel, die Planung für die Illerbrücke in Lautrach, wird in Kap. 8.4 beschrieben.

⁷³⁶ Vgl. auch „Das bisherige Probiervorgehen mit seinen zum Teil recht schwerfälligen und in hohem Masse von der Genauigkeit der Werkzeuge abhängigen graphischen Kunststücken, verdient eigentlich kaum den Namen ‚Entwurfsverfahren‘ und wird (...) bald gänzlich der verdienten Vergessenheit anheimfallen müssen.“ [Färber 1908, S. 3].

⁷³⁷ Vgl. [Dewitz 1908, S. 26–31].

⁷³⁸ Vgl. Kap. 8.4.

angewandt. Zuerst habe er die Stützlinie für die Beanspruchungen aus Eigen- und Verkehrslast konstruiert. Dann habe er mit dem Verfahren der Einflusslinien die Ergebnisse kontrolliert. Auf diese Weise können alle Ungenauigkeiten oder Fehler mit Sicherheit vermieden werden [Beutel 1903; 1904, S. 2].

7.7 Die Verwendung von Gelenken in schiefen Brücken am Beispiel der Hammerkanalbrücke in Esslingen⁷³⁹

Die ehemalige Reichsstadt Esslingen am Neckar⁷⁴⁰ erlebte im frühen 19. Jahrhundert als eine der ersten Städte in Württemberg begünstigt durch die geografischen Bedingungen einen bedeutenden wirtschaftlichen Aufschwung: Einerseits lag Esslingen an der Schnittstelle zweier Verkehrswege – der bereits in Römerzeiten angelegten späteren Reichsstraße von Speyer nach Ulm sowie einer Nord-Süd-Straße, die die Filder mit Schurwald und Remstal verband – andererseits bot die Lage am Neckar und seinen Kanälen ideale Voraussetzungen für die industrielle Entwicklung [Stedle et al. 2009, S. 29 und 57].⁷⁴¹ Der sehr frühe Anschluss an das Eisenbahnnetz im Jahre 1845 sowie zahlreiche Fabrikgründungen, darunter insbesondere die weit über die Grenzen Württembergs hinaus bekannte Maschinenfabrik Esslingen, prägten die Stadt in den Zeiten der Industrialisierung. Neue Flächen, sogar ganze Stadtteile mussten erschlossen werden, um Platz für die neuen Betriebe sowie Wohnraum für deren Arbeitskräfte zu schaffen.

Eine dieser Erweiterungen ist die Oststadt in Esslingen, deren Erschließung in den 1870er Jahren begann. Wenngleich sie auch die „*künftige staatliche Central-Lokomotiv-Werkstätte*“ [Keppler 1896; 1897, S. 447] beherbergen sollte, so ist sie doch im Wesentlichen durch Wohngebäude geprägt [Stedle et al. 2009, S. 66]. Während die Bautätigkeit anfangs noch langsam verlief, „*kam es in den 1890er Jahren zu einem wahren Neubauboom in diesem Stadtbezirk, der sich insbesondere ab 1895 zum wichtigsten Neubaugebiet der Stadt entwickelte.*“ [Stedle et al. 2009, S. 67]. Die logische Folge dieser rasanten Entwicklung war die Notwendigkeit einer guten Anbindung der neuen Stadtteile an die Kernstadt, insbesondere jedoch an den Bahnhof:⁷⁴² eine Brücke über den beide Gebiete trennenden Hammerkanal wurde erforderlich.

Zur Ausführung kamen mehrere Lösungen in Betracht, Überlegungen des Stadtbauinspektors Keppler⁷⁴³ dazu sind im Stadtarchiv Esslingen erhalten: Eine eiserne Balkenbrücke wurde von vornherein aus optischen Gründen wie auch wegen der Zwischenstütze in Kanalmitte ausgeschlossen. „*Von andren Konstruktionen kann nur noch*

⁷³⁹ Der Inhalt dieses Kapitels wurde in stark verkürzter Form vorveröffentlicht in [Veihelmann 2015a].

⁷⁴⁰ Zur historischen Entwicklung von Esslingen vgl. [Stedle et al. 2009], hier ist die Geschichte der Stadt und deren Stadtteile ausführlich dargestellt worden. Diese Quelle dient als Grundlage des vorliegenden kurzen Abrisses.

⁷⁴¹ Mehrere Artikel über den Einfluss der Wasserwege in Form von Neckar sowie den Kanälen auf die Entwicklung der Stadt Esslingen a. N. bietet die Aufsatzsammlung „Die Esslinger Stadtkanäle im Spiegel von Geschichte, Planung und Kultur“ [Stadt Esslingen am Neckar 2006].

⁷⁴² Vgl. [Keppler 1896; 1897, S. 447].

⁷⁴³ Unterschrieben ist die Abhandlung mit „Stadtbauamt Keppler Esslingen im Febr. 1896“. Keppler war zu dieser Zeit Stadtbauinspektor in Esslingen.

eine Bogenbrücke mit oben liegender Fahrbahn in Betracht kommen, der bei der Straßenbreite von 14,3 m für Parabel-Schwedler-System u. dergl. die Querträger zu schwer konstruiert werden müssen und die Ausführung deshalb ebenfalls teuer wird. Auch sind diese Brücken ihres unschönen Aussehens wegen im Zuge städtischer Baustraßen nicht zu empfehlen. Eine Halbierung der Straßenbreite durch einen in der Mitte gestellten dritten Parabel-Träger erscheint vollends unstatthaft.“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Auch von einem Moniergewölbe, also Eisenbeton, wurde Abstand genommen, weil die Erfahrungen mit dieser Bauweise noch nicht ausreichend schienen [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Die Wahl fiel schließlich auf eine Massivbrücke, wobei auf Naturstein verzichtet, „*dagegen einer Betonbrücke mit Kämpfer- und Scheitel-Gelenken, wie solche neuerdings mit Erfolg in Erbach, Rechtenstein, Munderkingen und Inzigkofen ausgeführt worden sind, gegenüber einer eisernen Brücke der Vorzug gegeben*“ wurde [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Die Gründe für die Wahl von Beton als Konstruktionsmaterial waren neben den technischen hauptsächlich Kostenersparnisse in der Ausführung, insbesondere aber im Unterhalt der Brücke [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].

Die 1896 gebaute Brücke (Abbildung 7.80) überspannt den innerstädtischen Kanal mit einer Spannweite von rund 19 m bei einer Breite von 14 m. Da die Oberkante des Straßenbelages wie auch das freizubleibende Profil für die Floßfahrt festgelegt waren, wurde die Pfeilhöhe auf 1,8 m bestimmt. Aufgrund der Gegebenheiten war es notwendig, die Brücke schief zu bauen, also in einem Winkel von $58,3^\circ$ zwischen Brücken- und Kanalachse⁷⁴⁴ (s. „*Obere Ansicht*“ in der Abbildung 7.86; Abbildung 7.87). Dieser Winkel ist insbesondere im Hinblick auf die Verwendung von Gelenken wesentlich, wie auch Keppler bereits erwähnt: „*Die Anordnung von Gelenken ergibt in Anbetracht der Schräge von $58^\circ 30'$ einige Schwierigkeit.*“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Im Weiteren wird dieses Thema der Gelenke in schiefen Brücken vertieft betrachtet.

Keppler beschreibt die Ausführung der Hammerkanalbrücke als Dreigelenkbogen wie weiter oben bereits zitiert. Die dort genannten Beispiele stellen jedoch bis auf Inzigkofen temporäre Gelenke dar. Bereits im Planungsstatus der Esslinger Brücke ist zu lesen: „*Die Anordnung der Gelenke hat den Zweck, die Wärmebewegungen der Brücke unschädlich zu machen.*“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Dies ist eine eindeutige Aussage zur Anwendung von permanenten Gelenken, was letztlich auch so ausgeführt wurde. Nach der Fertigstellung beschreibt Keppler die Vorteile: Die Verwendung von Gelenken ermögliche durch die statische Bestimmtheit die Minimierung der Abmessungen und damit Ersparnisse beim Material. Zur dauerhaften Funktion bemerkte er: „*Die gefährlichen Wirkungen der bei der Ausschalung eintretenden Senkungen und die Einflüsse der wechselnden Belastungen und Temperaturen werden gleichzeitig vermieden.*“ [Keppler 1896; 1897, S. 448]. Die überlieferte Diskussion in der Planungsphase der Brücke ist

⁷⁴⁴ Die Schiefe der Brücke wird im Allgemeinen von der Längsachse aus gemessen. Das heißt eine 90° „schiefe“ Brücke führt senkrecht und damit gerade über den Fluss bzw. den Verkehrsweg. Die Schiefe der Brücken wird mit Werten unter 90° angegeben, es wird also jeweils der kleinere Winkel als der maßgebende verwendet. Das heißt wiederum, je kleiner der angegebene Winkel, desto schiefere die Brücke. Eine Ausnahme zu dieser Messweise bildet z. B. die Munderkinger Donaubrücke: Leibbrand gab die Schiefe mit 15° an [Leibbrand 1894, S. 552], aus den Lageplänen ist jedoch zu entnehmen, dass die Brücke um 75° schief ist.

besonders interessant.⁷⁴⁵ Zur Ausführung von Gelenken in schiefen Brücken seien grundsätzlich zwei Möglichkeiten vorhanden: *„Es sind sowohl normal staffelförmig als schräg angeordnete Gelenke je zwischen Quadern liegend in Betracht gezogen worden.“* [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].

In einem im Stadtarchiv Esslingen erhaltenen Plan vom 21. Februar 1896 kann man die schräge Anordnung der Gelenke erkennen (Abbildung 7.81 sowie Prinzipskizze in Abbildung 7.82). Schräg angeordnete Gelenke hatten das Problem der Schubkräfte im Gelenk. Das war Keppler bereits bewusst, denn er begründete seine Überlegungen zur Anordnung der Gelenke: *„Bei den normalen staffelförmigen Gelenken wird im Gegensatz zu einer schrägen Anordnung das Auftreten von Scheerkräften vermieden.“* [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Die Ausführung von schrägen Gelenken kann nur als Sonderfall gewertet werden. Noch 1906 bezeichnet Max Leibbrand die Verwendung von schrägen Gelenken als seinen Vorschlag,⁷⁴⁶ sie seien jedoch noch nicht ausgeführt.⁷⁴⁷

Auch in Bezug auf die Abhandlung von Walter Nakonz aus dem Jahre 1913 ist die „standardmäßige“ Umsetzung bedeutend schräger Gelenke in der Praxis zweifelhaft: Er behandelt hier zwar die Ausführung schräger Gelenke bei zwei Brücken in Berlin-Plötzensee bis zu einem Winkel von 55°, allerdings beschreibt er nachstehend deren statisches Verhalten, da schiefe Dreigelenkgewölbe bis dahin nur wenig gebaut worden seien. Zum Umgang mit den Scherkräften in schrägen Gelenken schreibt er: *„Es muß dann natürlich dafür gesorgt werden, daß die beiden Gelenkhälften sich nicht in ihrer Längsrichtung gegeneinander verschieben können (...). Bei geringer Schiefe wird namentlich bei Beton oder Granit die Reibung hierzu ausreichen. Bei größerer Schiefe hat man sich bei Betongelenken durch senkrecht stehende Eisenplatten geholfen, die nur auf der einen Seite fest einbetoniert sind, damit ein Drehen in den Gelenken möglich ist (...). Wirksamer kann man diese Schubkräfte bei Stahlgelenken ausnehmen, indem man, wie es im vorliegenden Falle gemacht worden ist, besondere Knaggen anordnet, die ein Verschieben der Gelenkhälften gegeneinander verhindern.“* [Nakonz 1913, S. 636]. Nakonz baute parallele Zapfengelenksthühle mit schrägen Zapfen ein, so dass die Zapfen auf einer Achse lagen und

⁷⁴⁵ In der im Stadtarchiv Esslingen überlieferten Abhandlung sind handschriftliche Korrekturen vorgenommen worden. Vermutlich wurde die Reinschrift des von Keppler unterschriebenen Textes von einem Mitarbeiter gefertigt, die Korrekturen von Keppler selbst eingefügt (der Verfasserin liegt eine handschriftliche Notiz von Keppler vor, deren Schrift ähnlich aussieht). Da das Original mit Durchstreichungen und mehr oder weniger umfangreichen Ergänzungen etwas unübersichtlich ist und da die Verfasserin wie beschrieben von der einheitlichen Verfasserschaft Kepplers ausgeht, werden die Zitate hier ohne diese Kennzeichnung übernommen.

⁷⁴⁶ „Regierungsbauführer Leibbrand schlägt deshalb vor, sämtliche Gelenkachsen parallel zu den Kämpferlinien, wie bei gewöhnlichen Brücken, in eine Gerade zu verlegen und die bei dieser Anordnung in der Richtung der Gelenkachse auftretenden Seitenkräfte durch geeignete leicht mögliche Ausbildung der Gelenke aufzunehmen; bei Bolzengelenken z. B. durch Bunde an den Bolzen, oder zweckmäßiger noch durch doppelkonische Ausbildung derselben; die Scherkräfte zwischen Gelenkstuhl und Gewölbemauerwerk können in einfachster Weise durch geeignete Formgebung der Stühle oder angegossene Rippen aufgenommen werden, soweit dies nicht schon durch die Haftfestigkeit des Betons am Eisen erfolgt. Damit ist auch bei schiefen Brücken völlige statische Bestimmtheit erzielt.“ [Leibbrand 1906c, S. 458].

⁷⁴⁷ In einem anderen Artikel zum gleichen Thema, ebenso 1906, schreibt er explizit, dass bis zu diesem Zeitpunkt die im weiteren Verlauf dieses Kapitels beschriebene staffelförmige Anordnung „allein gebräuchlich“ gewesen sei [Leibbrand 1906b, S. 252; siehe hierzu auch das Zitat in Fußnote 750].

damit die gesamte Anordnung als schräges Gelenk wirkte [Nakoncz 1913, Atlas Blatt 67; Abbildung 7.83; Abbildung 7.84].

Bei der Hammerkanalbrücke wurde aufgrund fehlender Vorbilder von der Verwendung der schrägen Gelenke abgesehen: „*Um die Sicherheit dieser Anordnung zu erproben müßten Druckversuche wenigstens mit Modellen angestellt werden, und man will dieser, weil kein zwingender Grund zur Anordnung dieser schrägen Lager vorliegt, in Rücksicht der nicht unerheblichen Kosten vom weiteren Verfolg dieser Frage absehen.*“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Dagegen fiel die Wahl auf staffelförmig versetzte Gelenke (Abbildung 7.85): In einem zweiten Plan zur Hammerkanalbrücke in Esslingen vom 27. Februar 1896, also sechs Tage nach der ersten Planung mit schrägen Gelenken, ist die staffelförmige Anordnung gezeichnet (Abbildung 7.86). Als Gelenkart wählte Keppler Bleieinlagen, dafür ausschlaggebend war für ihn der „*Vorzug der Einfachheit und Billigkeit*“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].

Die Gelenke wurden dabei senkrecht zur Brückenstirn, jedoch nicht in einer Achse versetzt (Abbildung 7.86). Diese Ausführungsweise war zur Bauzeit der Brücke „üblich“.⁷⁴⁸ Karl von Leibbrand beschrieb schräge Gelenke nur dann als zulässig, wenn der Winkel sehr klein sei: „*Bei schrägen Brücken können die Gelenkeinlagen in einer und derselben Fuge nur dann durchgeführt werden, wenn die Schräge unbedeutend ist; ist dies nicht der Fall, so sind die Gelenkfugen treppenförmig, von den Scheitel- und Kämpferpunkten in den Gewölbestirnen ausgehend, nach dem sog. englischen Fugenschnitt anzulegen.*“ [Leibbrand 1897b, S. 46].⁷⁴⁹

Allerdings führte diese Ausführung ebenso zu unerwünschten Spannungen im Gewölbe, folgend aus der Tatsache, dass sich die Brücke nun nicht mehr um ein und dieselbe Achse drehte.⁷⁵⁰ Diese Nebenspannungen im Brückengewölbe wurden jedoch im Esslinger Fall als vernachlässigbar eingestuft [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].⁷⁵¹ Neben den überschaubaren Abmessungen der Brücke minderte auch die Ausführung der Gelenke mittels Bleieinlagen mit deren relativ guter Anpassungsfähigkeit die Risiken der

⁷⁴⁸ Zur Bauzeit der Hammerkanalbrücke waren nur wenige schiefe Dreigelenkbogen gebaut und bekannt: „eine Reihe durch das kgl. Ministerium des Innern ausgeführter Beispiele schiefer Brücken von ganz erheblichen Weiten mit Gelenken bzw. Bleieinlagen wie in Munderkingen, Forbach und Baiersbronn, von welchen z. B. die Forbacher bis zu 45° Schräge aufweist, haben die Zweckmäßigkeit dieser Brückenbauten in der Praxis bewiesen.“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].

⁷⁴⁹ Vgl. auch die Beschreibung der Munderkinger Brücke: „Die Gelenke sind nicht in einem Stück auf die ganze Gewölbelänge durchgehend angenommen worden, es sind vielmehr, entsprechend dem englischen Fugenschnitt des unter 15° schiefen Brückengewölbes, auf die Gesamtbreite der Brücke je 12 solcher 50 cm langen Gelenke treppenförmig neben einander, in Abständen von 10 cm eingesetzt worden.“ [Gugenhan 1894, S. 493].

⁷⁵⁰ Vgl. beispielweise: „Schiefe Gelenkbrücken führen bei der bis jetzt allein gebräuchlichen staffelförmigen Anordnung, wie z. B. in Munderkingen, zu statisch kaum zugänglichen Systemen. Die hierbei eintretende gegenseitige Lage der Gelenkachsen läßt eine Drehung nicht zu.“ [Leibbrand 1906b, S. 252]. Ein weiteres Beispiel für Negativkritik zum staffelförmigen Gelenk: „Ein Drehen der Gewölbehälften gegeneinander und gegen die Widerlager ist hierbei nicht mehr möglich, da ebensoviel Drehachsen wie Gelenkstaffeln vorhanden sind.“ [Nakoncz 1913, S. 635–636].

⁷⁵¹ Vgl. „Infolge ungleich wirkender Hebelarme bei der staffelförmigen Anordnung werden allerdings auch innere Spannungen im Brückengewölbe auftreten, dieselben können aber bei den vorliegenden kleinen Abmessungen außer Acht gelassen werden.“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].

Spannungen.⁷⁵² Ein weiteres Hilfsmittel zur Reduzierung der Nebenspannungen beschrieb Max Leibbrand: *„Doch sollten schiefe Brücken von größerer Breite, oder wenn der Winkel der Brückenaxe mit der Flußaxe klein ist, in einzelnen von einander unabhängigen Ringen⁷⁵³ und nicht als ein Ganzes zur Ausführung kommen, wenn überhaupt Gelenke angeordnet werden.“* [Leibbrand 1895/96, S. 75].⁷⁵⁴ Die erwähnte Aufteilung der Brückenbreite in mehrere Streifen wurde auch bei der Hammerkanalbrücke ausgeführt: *„Der Verfasser hat die Gelenke treppenartig gestellt, dabei aber die Brücke ihrer Breite nach im Entwurf in 3, bei der Ausführung in 4, mit den Stirnen parallele, isolirt bestehende Ringe abgetheilt. Bei den geringen Abmessungen der einzelnen Absätze werden hiedurch die in Folge Drehung um ein bestimmtes Gelenk in den neben befindlichen Gelenken etwa auftretenden Schwingungen auf ein Mindestmaß reduziert und durch Einlage von Bleiplatten unschädlich gemacht.“* [Keppler 1896; 1897, S. 448–449; Abbildung 7.86]. Besonders eindrucksvoll sieht man diese Aufteilung in Streifen am Beispiel der, allerdings gelenklosen, Bahnbrücken über die Eschenstraße⁷⁵⁵ in Dresden (Abbildung 7.88).

Beispiele für die Aufteilung des Gewölbes von Dreigelenkbrücken in Streifen entsprechend der einzelnen Gelenke sind der Verfasserin nicht bekannt. Streifen wurden zwar ausgeführt, dabei aber, wie von Keppler für die Hammerkanalbrücke beschrieben, mehrere Gelenke zusammengefasst. Dementsprechend vernichtend fällt das Gesamturteil von Max Leibbrand zu den staffelförmigen Gelenkanordnungen aus: *„Bei dem Bau von schiefen Brücken bietet die Einlage von Gelenken Schwierigkeiten; man hat in solchen Fällen, z. B. bei der Munderkinger Brücke, die Gelenke staffelförmig senkrecht zur Gewölbeachse angeordnet. Eine Drehung um diese Gelenke ist aber ohne Nebenspannung unmöglich, sofern das Gewölbe nicht in einzelnen Streifen, welche den Gelenken entsprechen, hergestellt wird, was nicht geschehen ist. Eine Drehung um die Gelenke kann also ohne ganz erhebliche Nebenspannung nicht erfolgen. Die schiefen Brücken mit Gelenken, wie sie bisher ausgeführt sind, sind alle statisch unbestimmt und sind der Rechnung kaum zugänglich.“* [Leibbrand 1906c, S. 458].

Beide Bauweisen – schräge und staffelförmige Anordnung – erwiesen sich mit ihren bauartbedingten Nachteilen als schwierig. Bereits im Rahmen des Inzigkofener Brückenbaus fasste Max Leibbrand die Vor- und Nachteile zusammen: Die Anwendung von Gelenken in schiefen Brücken sei nur von wenig Wert, da bei staffelförmiger Anordnung Nebenspannungen durch mehrere Drehachsen entstehen. Werden aber die Gelenke in einer Achse versetzt, so erhalte diese eine verdrehte und schiefe Lage, was

⁷⁵² Vgl. „Bei Verwendung von Bleiplattengelenken ist die Gefahr der Nebenspannungen verringert.“ [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52].

⁷⁵³ Nicht zu verwechseln mit dem Wölben in Ringen. In diesem Fall handelt es sich um die Aufteilung des Gewölbes in Längsrichtung, also gewissermaßen um das Bauen mehrerer unabhängiger schmaler Brücken nebeneinander. Wenngleich bauzeitlich des Öfteren von „Ringen“ die Rede ist, verwendet die Verfasserin zur sauberen Trennung der Bauweisen hier den Begriff „Streifen“.

⁷⁵⁴ Auch Karl von Leibbrand schlägt die Zerlegung in Streifen vor: „streng genommen sollte hierbei das Gewölbe in einzelne Ringe nebeneinander zerlegt werden.“ [Leibbrand 1897b, S. 46].

⁷⁵⁵ Beschreibung im Katalog unter Sa8.

ebenfalls nicht eingeplante Spannungen nach sich ziehe [Leibbrand 1895/96, S. 75].⁷⁵⁶ Noch 1913 schrieb Walter Nakonz in einem Artikel über schiefe Dreigelenkbogenbrücken aus Eisenbeton, dass bisher wenig schiefe Dreigelenkbrücken gebaut worden seien [Nakonz 1913, S. 635]. Die unsicheren Verhältnisse führten dazu, dass schiefe Brücken meist als eingespannte Bogen gebaut wurden. Noch im Jahre 1920 schrieb Nakonz in einem weiteren Artikel zum Thema: „*Den Bau schiefer massiver Bogenbrücken mit drei Gelenken wird man nach Möglichkeit zu vermeiden suchen.*“ [Nakonz 1920, S. 357].

Die eigentlich naheliegendste Lösung des Problems von Gelenken in schiefen Brücken wurde bei den frühen Bauten, insbesondere also auch bei der Hammerkanalbrücke, noch nicht in Erwägung gezogen: der Bau der Brücke ohne Berücksichtigung des Fluss- bzw. Straßenverlaufs in gerader Bauweise mit der geraden Anordnung der Gelenke in einer Achse (Abbildung 7.89). Diese Methode wurde bei den gelenklosen Brücken wie selbstverständlich angewandt, zumindest wenn die Brücken nur mäßig schief waren [z. B. Barkhausen 1892, S. 348]. Nachteilig war hier nur die Vergrößerung der Abmessungen der Brücke, also insbesondere der Spannweite. Ein Beispiel dafür ist der Entwurf für die 47° schiefe Weißeritz-Eisenbahnbrücke bei Potschappel, Dresden. Die Brücke wurde mit drei Gelenken geplant, dabei sollte das Gewölbe in Längsrichtung in vier gerade Streifen aufgeteilt werden. Dies hätte eine Vergrößerung der Lichtweite um im Mittel 4 m nach sich gezogen. Ausgeführt wurde dann ein gelenkloser Bogen [Schmidt 1908, S. 434–435]. Zu den Vor- und Nachteilen schrieb Walter Nakonz im Jahr 1920, dass bei grundsätzlicher Notwendigkeit von Dreigelenkbogen „*die Widerlager und die Gelenkfugen senkrecht zu den Brückenstirnen an[zuordnen seien, Erg. d. Verf.]. Die Brücke wird zwar länger und höher, was bei beschränkter Konstruktionshöhe von Bedeutung ist; etwaige Rampen fallen höher und daher kostspieliger aus. Aber man erhält klarere statische Verhältnisse; die Herstellung der Brücke wird einfacher.*“ [Nakonz 1920, S. 357].

Die Ausführung der vier Streifen der Hammerkanalbrücke erfolgte jeweils an einem Tag. Während der Scheitel mit Zementsäcken beschwert wurde, erfolgte die Betonierung gleichmäßig von den Widerlagern her. Noch heute kann man an den ausgeführten Bleigelenken der Hammerkanalbrücke, insbesondere im Kämpfer Reste von Asphalt sehen (Abbildung 7.90). Die Fugen wurden nach der Fertigstellung oberseitig mit Asphalt vergossen, unten blieb die Fuge frei. Dies diente dem Feuchtigkeitsschutz der Gelenkeinlagen. Vom Bau der Leinebrücke in Grasdorf ist hierzu überliefert: „*Bevor die Abdeckung über dem Scheitel geschlossen wurde, ist die obere Hälfte der Gelenkfuge an den Stirnen des Gewölbes auf etwa 8 cm Tiefe verfugt und im Uebrigen mit heißem Asphalt vergossen worden; die untere Hälfte blieb offen. Ebenso wurde an den Kämpfern verfahren, doch ist dort auch der untere Theil der Fugen geschlossen worden und zwar durch Einstemmen dünner, mit Asphalt dick umhüllter Schnüre. Da in diese Fugen das Wasser*

⁷⁵⁶ Ausführlich: „Die Anwendung von starren Gelenken bei schiefen Brücken ist deshalb nur von bedingtem Werte, da, wenn die Gelenke je eines Kämpfers, bezw. im Scheitel staffelförmig hintereinander in einer Ebene verlegt werden, so viele Drehaxen als Gelenke vorhanden sind, so daß bei der Drehung um irgend ein bestimmtes Gelenk Schwingungen um die andern Gelenke eintreten müssen, und, da solche nicht möglich sind, bedeutende Nebenspannungen auftreten; werden aber die Gelenke an jedem Kämpfer bezw. im Scheitel in eine Drehaxe verlegt, so erhalten diese Axen mehr oder minder starke entgegengesetzte Steigungen, so daß eine windschiefe Verdrehung des ganzen Gewölbes entsteht, welche ebenfalls von bedeutenden Nebenspannungen begleitet ist.“ [Leibbrand 1895/96, S. 75].

gelangen konnte, lag die Gefahr einer Beschädigung durch Frost vor.“ [Bock, Dolezalek 1901, S. 336].⁷⁵⁷ Sicherlich lag auch in Esslingen in den Kämpfergelenken Frostgefahr vor, hier wurden die Gelenkfugen unterseitig jedoch nicht verschlossen [Keppler 1896; 1897, S. 458].

Die architektonische Ausbildung des Dreigelenkbogens der Hammerkanalbrücke war bauzeitlich sehr modern: Wie in Kap. 7.3 ausführlich dargestellt wurde, war die sichtbare Konstruktion zu dieser frühen Zeit noch weitgehend verpönt, insbesondere wenn man die innerstädtische Lage der Hammerkanalbrücke bedenkt. Bereits während der Planung aber sprach sich Keppler für die offensichtliche Sichtbarmachung von Material und Konstruktion aus: *„Der Character einer Betonbrücke soll durch wulstartiges Profil des Bogens, und die Gelenke durch entsprechende Profilierung der Quader zum Ausdruck gebracht werden.“* [StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52]. Die Profilierung des Bogens mit dem wulstartigen Aufbau (Abbildung 7.80) war außergewöhnlich, zeitgleiche Brücken imitierten vorzugsweise eine Ausbildung des Bogens in Naturstein.⁷⁵⁸ Und auch die Bogenverdickung in den Bruchfugen des Dreigelenkbogens wird ausdrücklich gezeigt.⁷⁵⁹ Der Brückenbogen weist im Scheitel eine Stärke von 40 cm auf, verdickt sich bis in die Bruchfugen auf 80 cm, um sich dann bis zu den Kämpfern auf 45 cm zu verjüngen. An den Stirnflächen wurde eine 5–10 cm dicke Schicht besonders feinen Betons verwendet, um glattere Ansichtsflächen zu erhalten. Die ursprüngliche Farbgestaltung der Brücke ist heute nur noch ansatzweise zu erkennen: *„Die Zwickel sind mit bläulicher und die Wulste mit gelblicher Amphibolin-Farbe bemalt, was im Verein mit dem feurigen Roth der Buntsandsteinquader, Gesimsplatten und Postamente und dem dunkeln und goldbronce Anstrich der schmiedeisernen Geländer eine gute Farbenwirkung erzielt.“* [Keppler 1896; 1897, S. 458].

Wenn man sich ins Gedächtnis zurückruft, dass Inzigkofen 1895 die erste Brücke mit permanenten Gelenken war,⁷⁶⁰ so wird deutlich, wie fortschrittlich der Gedankengang im Rahmen des Entwurfs und der Ausführung der Hammerkanalbrücke zu den permanenten Gelenken im Jahr 1896 war. Während die Inzigkofener Brücke im Zweiten Weltkrieg zerstört wurde, ist die Hammerkanalbrücke in nahezu unverändertem Zustand bis heute voll in Nutzung. Sie ist zusammen mit dem Inundationsviadukt in Dresden als ältestes

⁷⁵⁷ Ähnliche Beschreibung: „Die offene Scheitelfuge wird an der Rückseite mit Teerstrick ausgestemmt, mit Goudron vergossen und sodann durch einen übergelegten Zinkstreifen, welcher wiederum durch einen breiteren Asphaltfilzstreifen geschützt wird, gesichert. An der Ansichtsfläche wird die Fuge mit plastischem Kalkmörtel verstrichen, welcher ein Schließen der Fuge zulässt. Die geschlossenen Kämpferfugen werden an der Rückseite durch Zink- und Asphaltfilzstreifen in der vorgeschilderten Weise abgedeckt. Im Putz der Ansichtsflächen wird die Fuge scharf eingeschnitten, damit beim Oeffnen ein gerader Riss entsteht.“ [Köhler 1908, S. 303].

⁷⁵⁸ Z. B. Schmiechbrücke in Ehingen, Abbildung 7.33.

⁷⁵⁹ „Im Uebrigen war der Verfasser bestrebt, speziell Form und Aussehen der Betonbrücke mit Gelenken möglichst zur Anschauung zu bringen, daher sowohl die Bleifugengelenke als auch die charakteristische Verdickung des Betongewölbes in der Bruchfuge an den Stirnen sichtbar gelassen wurde.“ [Keppler 1896; 1897, S. 458].

⁷⁶⁰ Vgl. Kap. 7.3.

erhaltenes permanentes Gelenk einzuordnen.⁷⁶¹ Bestätigt wird diese Annahme durch eine Auflistung von Kollmar zu den permanenten Bleigelenken: „Während bisher die Bleigelenke meist nur dazu dienten, die Formänderungen der Gewölbe und Widerlager während des Baues und der Ausrüstung unschädlich zu machen, steht der Ausführung dauernd offener Gelenke durchaus nichts im Wege.“ [Kollmar 1919, S. 30]. Kollmar bespricht in diesem Zusammenhang also die permanenten Bleigelenke und merkt in einer Fußnote an: „Bei einigen sehr flachen Brücken mit gutem Erfolge zur Anwendung gekommen: Neckarbrücke Fisingen 1895, Hammerkanalbrücke Esslingen, 1896, Argenbrücke 1898 usw.“ [Kollmar 1919, S. 30]. Die Hammerkanalbrücke war demnach die zweite flachgespannte Brücke mit permanenten Bleigelenken, wobei die Neckarbrücke in Fisingen zerstört ist. In diesem Zusammenhang sollte man vielleicht nochmals kurz zur Schmiechbrücke in Ehingen, 1895, zurückkommen: Im Kapitel 7.3 wurde diese Brücke als „gedanklicher Vorläufer der permanenten Gelenke“ bezeichnet, weil die Gelenke erst fünf Jahre nach Fertigstellung vergossen wurden. Inwiefern ein dermaßen spät eingegossener Mörtel jedoch an der Lastabtragung beteiligt ist, ist zweifelhaft. Technisch bzw. statisch gesehen könnte man hier deshalb schon von einem permanenten Gelenk sprechen. Die Schmiechbrücke wurde bauzeitlich allerdings nicht unter die permanenten Gelenke eingeordnet. Bei der Hammerkanalbrücke wurde bereits von vornherein ein permanentes Gelenk geplant, was grundsätzlich einen anderen Gedankengang beinhaltet. Die Wichtigkeit der Hammerkanalbrücke schon zur Bauzeit kann man aus der Beschreibung der Brückeneinweihung unter Teilnahme der beiden wichtigsten Brückenbauer Württembergs ersehen: „Aus der hiebei durch die Stadt veranstalteten Einweihungsfeierlichkeit, an welcher u. A. Herr Präsident v. Leibbrand aus Stuttgart und der Erbauer der Donaubrücke bei Inzigkofen, Herr Landesbaurath Leibbrand aus Sigmaringen theilnahmen, ist hervorzuheben, dass, abgesehen von der wichtigen Bedeutung der Brücke für die bauliche Weiterentwicklung der Stadt, auch die Brückenbaukonstruktion selbst wegen ihrer leichten, gefälligen Formen, die diese verdienstliche Neuerung aufweist, gebührende Anerkennung fand.“ [Keppler 1896; 1897, S. 459; Abbildung 7.91]. Viele Jahre blieb die Hammerkanalbrücke in Esslingen unerkannt, bis sich im Rahmen der Forschungsarbeit der Verfasserin der hohe historische Wert dieses Denkmals herausstellte. Die Brücke wurde inzwischen als technisches Denkmal nachqualifiziert.

⁷⁶¹ Wobei der Inundationsviadukt bekanntermaßen über Betongelenke verfügt und schwerwiegende Eingriffe erdulden musste.

8 DENKMALPFLEGE

Die wissenschaftliche Betrachtung Technischer Denkmale, also Denkmale der Technik-, Industrie- und Verkehrsgeschichte, ist eine vergleichsweise junge Disziplin.⁷⁶² Während sich die Bau- und Kunstdenkmalpflege ausbildete, gehörten diese Objekte nicht zum Untersuchungsbereich. Ausnahmen bildeten lediglich solche Bauwerke, die auch als Bau- und Kunstdenkmale anerkannt waren, wie beispielsweise historische Mauerwerksbrücken oder Vergleichbares [Bock 2006, S. 187]. Wie bereits im Kap. 2.1 angedeutet, hatte die Industrialisierung drastische Umwälzungen hervorgerufen, die nicht nur positiv angenommen wurden. Die einschneidenden Veränderungen sowohl in Sozial- als auch in Wirtschaftsstrukturen einschließlich der damit verbundenen Auswirkungen auf den Lebensraum der Menschen erzeugten Widerstand.⁷⁶³ 1904 wurde der Deutsche Bund Heimatschutz gegründet mit dem Ziel, die *„deutsche Heimat mit ihren Denkmälern und der Poesie der Natur vor weiterer Verunglimpfung zu schützen.“* [Bock 2006, S. 188–189]. Zunächst gerieten damit jedoch nur die vorindustriellen, technischen Denkmale in das Blickfeld des Heimatschutzes.

Oskar von Miller war eine der Hauptfiguren der Technikdenkmalpflege zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Er regte 1903 die Gründung des Deutschen Museums in München an, um dort Meisterwerke der Naturwissenschaft und Technik zu sammeln und auszustellen [Bock 2006, S. 190]. Von Miller prägte auch den Begriff der Technischen Kulturdenkmale, der heute als Zeichen für die Emanzipation der Ingenieure gedeutet wird [Bock 2006, S. 190–191]. Nachdem Oskar von Miller in Vorbereitung des Museumsaufbaus einige Reisen unternommen hatte, u. a. auch in das Freilichtmuseum Skansen bei Stockholm, folgte sein Aufruf, derartige Objekte in situ zu bewahren und nicht – wie im Skansen – translozierte Bauwerke an neuer Stelle zusammenzustellen. Bock wertet in ihrer Abhandlung diesen Aufruf als *„bahnbrechend (...), auch wenn diese Idee zunächst durch den Ersten Weltkrieg vereitelt wurde.“* [Bock 2006, S. 191]. Weitere in diese Richtung zielende Bemühungen in den Zwischenkriegsjahren wurden durch den Ausbruch des Zweiten Weltkrieges wiederum zunichtegemacht.

Die aus dem Zweiten Weltkrieg resultierenden fatalen Zerstörungen führten in den Nachkriegsjahren zu einer Fokussierung auf hochrangige Bau- und Kunstdenkmale [Hubel 2006, S. 126]. Weiterhin entwickelte sich in der Aufbruchsstimmung der 50er-Jahre ein enormer Platzbedarf der Investoren: Banken, Kaufhäuser usw. wurden in besten Innenstadtlagen gebaut, Straßen bedenkenlos verbreitert. Das Wirtschaftswachstum katapultierte die Republik in kürzester Zeit aus der schlimmsten Notzeit in zunehmenden Wohlstand. Allerdings wurde dieser Entwicklung alles andere, insbesondere also auch der denkmalgerechte Umgang mit historischer Bausubstanz, untergeordnet [Hubel 2006, S. 126–127].

⁷⁶² Die Geschichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege ist in [Hubel 2006] sehr anschaulich aufbereitet. Eine Betrachtung zur Geschichte der Technikdenkmalpflege findet sich in demselben Werk als Exkurs [Bock 2006]. Eine weitere, sehr gut strukturierte Quelle ist das *„Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege“* [Martin, Krautzberger 2010, zu technischen Denkmälern insbesondere Teile C.V. und D.4].

⁷⁶³ Die Zeitschrift *„Die Denkmalpflege“* beschrieb die Situation im Jahre 1904 wie folgt: *„Die Verwüstungen des dreißigjährigen Krieges haben nicht so verheerend gewirkt, so gründlich in Stadt und Land mit dem Erbe der Vergangenheit aufgeräumt, wie die Übergriffe des modernen Lebens mit seiner rücksichtslos einseitigen Verfolgung praktischer Zwecke.“* [Bock 2006, S. 188].

Erst langsam wurde der Bevölkerung bewusst, dass der Umschwung auch einen bedeutenden Verlust an Kulturgut bedeutete. Hubel bezeichnet es in seiner Geschichte der Denkmalpflege als eine nach jahrelanger Euphorie folgende Phase der Ernüchterung, *„die den Menschen bewusst machte, was sie schon alles verloren hatten und was weiterhin bedroht war.“* [Hubel 2006, S. 132]. In der Folge entstanden Bürgerinitiativen, die sich gegen den Abriss von Denkmälern wendeten, Verkehrsberuhigungen in Städten forderten und sich für den Naturschutz engagierten [Hubel 2006, S. 132]. Das Umdenken mündete in der Verabschiedung der Denkmalschutzgesetze in allen Bundesländern im Laufe der 1970er Jahre [Hubel 2006, S. 133].

Sicherlich lag der Fokus des bürgerschaftlichen Engagements hier anfänglich noch auf herausragenden Einzeldenkmälern wie etwa Kirchen oder Schlössern, die Industriedenkmalpflege folgte jedoch. Die Situation in Bayern in der Nachkriegszeit beschrieb der bayerische Denkmalpfleger Rembrandt Fiedler in einem 2008 erschienenen Artikel: *„In den 1950ern waren Industriebauten kein Gegenstand der Denkmalpflege und ihre Erfassung steckte in den 1960ern noch in den Kinderschuhen.“* [Fiedler 2008, S. 372].

Das Beispiel der 1964 erneuerten Trisannabrücke der Arlbergbahn zeigt das damals herrschende Verständnis von Industriedenkmalpflege. Sie wurde 1882–1884 als Fachwerkträger mit halbparabelförmigem Obergurt mit einer Spannweite von 120 m als seinerzeit längste Eisenbahnbrücke Österreichs errichtet und in den Jahren 1922–1923 durch einen bogenförmigen Untergurt verstärkt [Swittalek 1976, S. 117; Abbildung 8.1]. In den 1960er Jahren veranlassten „betriebstechnische Gründe“ die Österreichischen Bundesbahnen zu einer Erneuerung des Bauwerks, man sei sich jedoch *„des Umstandes bewußt, daß hier eine weit über Österreich hinaus bekannte Denkmalsituation, bestehend aus dem technischen Bauwerk, der mittelalterlichen Burg am Ostende der Brücke und der schönen Gebirgslandschaft, gegeben ist.“* [Swittalek 1976, S. 117]. Man habe sich daher entschlossen, *„dieser Situation Rechnung zu tragen und die Brücke in der ursprünglichen Form – nicht in der ursprünglichen Konstruktion, denn gewählt wurde ein Stabbogen als System des neuen Tragwerkes! – zu erneuern.“* [Swittalek 1976, S. 117; Abbildung 8.2]. In seinem Artikel zu Technischen Denkmälern zog Peter Swittalek noch im Jahre 1976 folgendes positives Resümee: *„Die Erhaltung des ursprünglichen Erscheinungsbildes – nur zu geringen Teilen des Denkmals selbst – war hier an einem prominenten Bauwerk auf Grund technischer und wirtschaftlicher Voraussetzungen auch ohne Hinzutreten der Denkmalpflege weitgehend möglich; sie hätte sich bei Fehlen dieser Voraussetzungen wohl kaum erfolgreich durchsetzen können“* [Swittalek 1976, S. 117]. An anderer Stelle im selben Artikel stellte Swittalek weiter fest: *„Da technische Denkmale häufig keine individuellen, unwiederholbaren Leistungen sind, kommt es auch bei der Erhaltung nicht so sehr auf das individuelle historische Dokument an.“* [Swittalek 1976, S. 113]. Und im weiteren Verlauf des Textes: *„Seine Funktion bildet den Denkmalcharakter. Die technische Weiterentwicklung fordert stets – früher oder später – Umbau oder gar Aufgabe der Anlage.“* [Swittalek 1976, S. 114].

Den Wandel in der Wahrnehmung der Industriegeschichte datierte Fiedler auf die Zeit nach der Einführung des Denkmalschutzgesetzes, in Bayern also nach 1973 [Fiedler 2008, S. 374].

Die Erhaltung von Technischen Denkmälern unterliegt im Vergleich zu „normalen“ Bau- und Kunstdenkmälern spezifischen Anforderungen. Letztlich sind alle Bauwerke Änderungen unterworfen, Hubel erläutert dies an einem einfachen Beispiel: Auch wenn das barocke Wohnhaus meist kein Badezimmer besessen habe, verlange eine heutige Nutzung die Anpassung an moderne Anforderungen. Die Nutzbarkeit sei für den Erhalt des Denkmals wichtig und damit seien Zugeständnisse zu machen, wenn dies das Denkmal nicht entscheidend beeinflusse [Hubel 2006, S. 81].⁷⁶⁴ Bei der Betrachtung von Brücken hingegen sind derartige Konzessionen meist einschneidender, wie das Beispiel der Trisannabrücke zeigt.

Der Erhalt einer historischen Brücke ist am einfachsten bei unveränderter Nutzung. Hier reichen im Allgemeinen Unterhaltsmaßnahmen aus, zumindest dann, wenn sich keine Schäden am Tragwerk zeigen. Schwieriger wird es bei der Aufgabe eines Bauwerkes oder bei einer Erhöhung bzw. Änderung der Anforderungen, dieser Aspekt wird im Kap. 8.2 näher betrachtet. Bei der Aufgabe einer Brücke z. B. wegen Unrentabilität einer Eisenbahnstrecke ergeben sich nur wenige Alternativen. Die Umnutzung, die bei anderen Bauwerkstypen, teilweise gewiss unter erschwerten Randbedingungen, meist ausführbar ist, ist bei Brücken nur bedingt möglich. Während beispielsweise bei einem Gebäude Wohnen, Unterbringung von Einrichtungen der öffentlichen Hand, museale sowie gewerbliche Nutzung für Handwerk, Gastronomie oder Industrie und vieles mehr denkbar sind, bleibt für eine Brücke immer lediglich eine Nutzung: die Über- bzw. Unterführung des Verkehrs.⁷⁶⁵ Hier ist allein die Änderung der Art des „Verkehrsmittels“ zu erwägen, insbesondere sind hier die vielen Bahntrassenradwege zu nennen, die in den letzten Jahrzehnten auf aufgelassenen Eisenbahnstrecken entstanden sind.⁷⁶⁶ Die hin und wieder im Eisen- bzw. Stahlbrückenbau praktizierte Translozierung⁷⁶⁷ ist bei Massivbrücken selbsterklärend nicht praktikabel. Falls eine Einbindung in das Verkehrswegesystem also nicht umsetzbar ist, bleiben nur Abriss oder der Verbleib ohne Nutzung.⁷⁶⁸ Die auf diese Weise entstehende funktionslose Skulptur sieht sich der Schwierigkeit ausgesetzt, dass sie keinen Unterhaltsmaßnahmen wie beispielsweise der Entfernung von Bewuchs mehr unterzogen wird. Ein langsamer Verfall ist meist nicht zu verhindern.

⁷⁶⁴ Hubel erläutert den Sachverhalt im Rahmen der Darstellung der Denkmalwerte nach Alois Riegl [Hubel 2006, 77–84]. Die ausführliche Erklärung seiner Wertekategorien kann a. a. O. nachgelesen werden und wird im Rahmen vorliegender Arbeit nicht wiederholt.

⁷⁶⁵ Eine Ausnahme bildet hier beispielsweise die sogenannte Kletterbrücke in Laupheim (Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü16). Diese Brücke wurde im Zweiten Weltkrieg als Anschluss des Flughafens Laupheim an die Bahnstrecke Laupheim–Schwendi erbaut, ging aber nie in Betrieb. Sie steht als Solitär ohne Anschlussbahndämme und ohne „Primärfunktion“ in der Landschaft. Der Deutsche Alpenverein hat diese Brücke zu einer Kletteranlage für Kinder und Jugendliche umgenutzt [DAV].

⁷⁶⁶ Siehe hierzu beispielsweise die private Internetseite bahntrassenradeln.de, die solche Radwege auflistet und beschreibt.

⁷⁶⁷ Insbesondere wurde die Wiederverwendung an anderem Ort nach den umfassenden Zerstörungen des Zweiten Weltkrieges praktiziert. Ein Beispiel stellt die Karl-Lehr-Brücke in Duisburg dar: Diese Brücke wurde unter Verwendung von Teilen der Kölner Hohenzollernbrücke wiederaufgebaut [Metropole Ruhr], während noch verwendbare Teile der Karl-Lehr-Brücke wiederum in Münster-Hiltrup für den Wiederaufbau der Prinzbrücke über den Dortmund-Ems-Kanal eingesetzt wurden. Diese Brücke wird wohl demnächst einem Neubau weichen müssen [Wasser- und Schifffahrtsamt Rheine 2014, S. 3].

⁷⁶⁸ Z. B. die Eisenbahnbrücke über die Wertach in Nesselwang (Beschreibung im Katalog unter BY19) oder die Viadukte der Heubergbahn (Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü10 und Ba-Wü11) u. v. m.

8.1 Konstituierende Merkmale

Bei der Begutachtung einer Brücke stellt sich die Frage, welche Merkmale deren Denkmaleigenschaft ausmachen und im Falle einer Sanierungs- oder Ertüchtigungsmaßnahme zu erhalten sind.

Zur Begriffsbestimmung von Denkmalen liefert das Bayerische Denkmalschutzgesetz folgende Definition: *„Denkmale sind von Menschen geschaffene Sachen oder Teile davon aus vergangener Zeit, deren Erhaltung wegen ihrer geschichtlichen, künstlerischen, städtebaulichen, wissenschaftlichen oder volkskundlichen Bedeutung im Interesse der Allgemeinheit liegt.“* [Freistaat Bayern 2009, Art. 1, Abs. 1]. Eine ausdrückliche Nennung Technischer Denkmale, also die technische Bedeutung, ist im bayerischen Denkmalschutzgesetz nicht enthalten,⁷⁶⁹ allerdings können diese Gründe unter der wissenschaftlichen Bedeutung eingeordnet werden.

Hubel benennt als entscheidendes Moment für die Anerkennung eines Objekts als Denkmal die Zeit seit seiner Entstehung, erst die Geschichtlichkeit mache die Deklaration als Denkmal möglich [Hubel 2006, S. 140]. Im Falle der in vorliegender Arbeit betrachteten Brücken, die überwiegend vor dem Ersten Weltkrieg erbaut worden sind, ist diese Voraussetzung ebenso grundsätzlich erfüllt wie diejenige, dass sie von Menschen geschaffene Sachen sind.

Für das Interesse der Allgemeinheit ist eine Klassifizierung notwendig, denn es ist nicht sinnvoll, alle Bauwerke zu erhalten, nur weil sie den Grundvoraussetzungen der Geschichtlichkeit und der Herstellung durch den Menschen entsprechen. Weitere Kriterien, die für die Denkmalqualität eines Objektes sprechen, sind nach Hubel der Erhaltungszustand, die funktionale Gesamtheit und die Seltenheit eines Bauwerkstyps [Hubel 2006, S. 156].⁷⁷⁰ Die Klassifizierung der Denkmale, die Hubel damit anregt, dient dazu, jene Denkmale bevorzugt betreuen und finanziell fördern zu können, die erhaltenswerter scheinen als andere [Hubel 2006, S. 158].

Wenn man die vorstehenden Kriterien auf die Beurteilung von Stampfbetonbrücken anwenden möchte, so können etwa die folgenden Eigenschaften in Betracht gezogen werden:⁷⁷¹

⁷⁶⁹ Im Gegensatz dazu nennen die Denkmalschutzgesetze anderer Länder technische Gründe ausdrücklich (Brandenburg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein, Thüringen) [Denkmalschutzgesetze online verfügbar: Göhner 2013].

⁷⁷⁰ Vgl. „Großes Gewicht kommt etwa dem Erhaltungszustand zu, so dass kaum veränderte Bauten aus den jeweiligen historischen Epochen denkmalwürdiger erscheinen als Häuser, die so oft umgebaut wurden, dass nicht mehr viel von den älteren Phasen erhalten geblieben ist. Auch die funktionale Gesamtheit wird berücksichtigt werden: Ein Bauernhof, der mit Toreinfahrt, Scheunen, Stallanlagen und Backhaus komplett erhalten ist, wird mehr Beachtung finden, als wenn nur noch das Bauernhaus selbst zwischen Silos und Betonbauten stehen würde. Ebenso darf die Seltenheit als Kriterium gelten: Das letzte Beispiel eines Gerberhauses in einer Region muss aufmerksamer bewahrt werden, als wenn es noch Dutzende von Exemplaren geben würde.“ [Hubel 2006, S. 156].

⁷⁷¹ Vgl. auch die Definition im „Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege“: Denkmalwürdig und damit erhaltenswert sind historisch typische sowie historisch einzigartige Objekte, Anfangs- oder Endglieder einer technischen Entwicklungsreihe, sozialgeschichtliche Strukturen aufzeigende Objekte, für geistes- und

wissenschaftliche Bedeutung: Die vorliegende Arbeit betrachtet insbesondere die ingenieurwissenschaftlichen Besonderheiten von Brücken. Dazu gehören in erster Linie das System und seine Abmessungen, beides wiederum abhängig von der Entstehungszeit. So ist eine Dreigelenkbrücke von 1896 sicherlich höherwertig einzustufen als eine solche von 1910. Vergleichbar ist die Beurteilung der Abmessungen: Die Lichtweite von 7 m der Lennebrücke in Vorwohle wäre somit 20 Jahre später kaum noch der Rede wert.

Weiterhin sind innovative Gedankengänge, die hinter der Ausführung stecken, nennenswert, wie beispielsweise der Einsatz von Gelenken. Zur Beurteilung des Denkmalwertes müssen jedoch neben den technischen, also die Ingenieurwissenschaften betreffenden auch weitere relevante Aspekte betrachtet werden: So sind beispielsweise die Bauwerke des Münchner Brückenbauprogramms⁷⁷² sicherlich nicht nur aus technischer Sicht erhaltenswert, sie haben auch eine geschichtliche, künstlerische und städtebauliche Wertigkeit.

Erhaltungszustand: Zum Erhaltungszustand gehören im Idealfall die bis heute bewahrte Funktion der Brücke, das erhaltene System, einzelne Bestandteile wie Geländer und Konsolen, insbesondere aber auch die unveränderten Oberflächen. An diesen lässt sich, wie am Beispiel der Illerbrücke in Lautrach im Kap. 8.4 erläutert wird, die Bautechnik ablesen. Für die Forschung ebenfalls von Bedeutung sind die unveränderten Eigenschaften des Materials, was z. B. gegen groß angelegte Verfestigungen spricht.

funktionale Gesamtheit: Hierzu zählen neben der erhaltenen Funktion und den bereits genannten Bestandteilen wie Konsolen oder Geländer auch die umgebenden baulichen Anlagen, im Falle von Eisenbahnbrücken etwa die anschließenden Bahndämme.

Seltenheit: Wie in dem oben angeführten Beispiel bereits erläutert, ist eine Brücke mit dem Prädikat „die einzige erhaltene ihrer Art“ oder „die älteste erhaltene ihrer Art“ höher einzustufen als zahlreich vorkommende, einander ähnliche Brücken. Als Beispiel kann hier die im Kap. 7.7 behandelte Brücke über den Hammerkanal in Esslingen dienen. Durch den Verlust der Inzigkofener Brücke rückt diese an die Stelle der ältesten erhaltenen Brücke dieser Bauart.

Im Einzelfall können sicherlich auch weitere Kriterien auftreten, beispielsweise könnte hier die Beteiligung einer herausragenden Ingenieurpersönlichkeit am Bau der Brücke stehen. Letztlich ist jedes Objekt für sich zu betrachten. „Kochrezepte“ gibt es dafür nicht.

8.2 Erhöhte Anforderungen

Der Bedarf von Maßnahmen an Brücken-Denkmalen lässt sich grob in zwei Gruppen aufteilen: Sanierungen aufgrund von auftretenden Schäden und Ertüchtigungsmaßnahmen wegen veränderter Anforderungen. In einem ersten Abschnitt sollen hier die auftretenden Probleme benannt werden, wohingegen die Bewertung und

kulturgeschichtliche Sachverhalte repräsentative technische Objekte [Martin, Krautzberger 2010, Teil C, Abschnitt V, Rn. 73].

⁷⁷² Vgl. Fußnote 366.

der Umgang mit diesen Themen anhand von Beispielen erst im Kapitel 8.3 diskutiert werden soll.

Typische Schäden an Stampfbetonbrücken sind beispielsweise abplatzende Kanten und Konsolen. Das Schadensbild ist dadurch zu begründen, dass die Ausbildung der Kanten durch erschwertes Stampfen schwierig war und dass diese Bauteile den Witterungsverhältnissen in höherem Maße ausgesetzt sind als beispielsweise glatte Flächen, da hier die Oberfläche und damit die Möglichkeit des Wasserzutritts im Verhältnis zur Masse relativ groß ist. Der Wasserzutritt wiederum begünstigt Frostschäden und damit Absprengungen an diesen Bauteilen. Die Abbildung 8.3 zeigt ein Beispiel dieses Schadensbildes: Die Rottachbrücke in Kempten-Rothkreuz weist auf der nach Westen zeigenden Seite größere Abplatzungen an den Bogenkanten sowie Schäden an den Konsolen auf.

Des Weiteren sind Risse als häufig auftretende Phänomene zu bezeichnen. Hierbei sind verschiedene Rissarten zu unterscheiden: Nahezu jede Brücke aus Beton weist Schwindrisse auf. Diese zeichnen sich durch einen unregelmäßigen, netzartigen Verlauf aus. Oft sind sie heute zugesetzt durch Ausblühungen oder Schmutz (Abbildung 8.4). Eine weitere Rissart stellen die Bewegungsrisse dar, die im Kap. 7.3 bereits ausführlich erläutert wurden. In der Abbildung 7.18 ist ein eingespannter Vorlandbogen der Rosensteinbrücke in Stuttgart-Bad Cannstatt zu sehen. Im Bogen wurden keine Dilatationsfugen vorgesehen, so dass die Bewegungen hier zu einer Trennung im Bogenzwickel führten. Statisch bedingte Risse, also aus Überbelastung wurden im Rahmen dieser Arbeit kaum festgestellt. Nicht alle Risse können diesen Kategorien zugeordnet werden: Es wird immer auch Sonderfälle geben, wie beispielsweise Setzungen im Untergrund (Abbildung 7.68) oder die Risse in den Bogenzwickeln der Kemptener Illerbrücken.⁷⁷³

In jedem Falle sind vorhandene Risse sowie deren Ursachen und Verhalten sorgfältig zu untersuchen. Es ist unbedingt zu überprüfen, ob sie bereits bauzeitlich auftraten und damit meist ungefährlich oder ob sie auf eine nachträgliche Einwirkung zurückzuführen sind. Weiterhin ist entscheidend, ob der Riss und damit die Gefährdung des Bauwerks kontinuierlich wachsen oder ob ein Riss beispielsweise aufgrund von Temperaturänderungen entsteht und sich dadurch im Winter öffnet, im Sommer jedoch wieder schließt. Oftmals werden diese sichtbaren „Risse“ fehlinterpretiert, weitere Beispiele dazu werden in den Kap. 8.3 und 8.4 noch näher betrachtet. In Abbildung 8.5 und Abbildung 8.6 ist ein kleineres Brückenbauwerk der Bahnstrecke Mühldorf–Freilassing abgebildet. Diese Brücke zeigt eine Vielzahl an „Rissbildern“: Wiederum sind die netzartigen Schwindrisse gut erkennbar, des Weiteren Bewegungs-, Stampf- und Abschnittsfugen sowie der Verlauf der Entwässerung, der sich durch eine oberhalb des Bogens vom Scheitel abfallende Linie kennzeichnet.⁷⁷⁴ Keines der hier sichtbaren Phänomene zieht eine Einschränkung der Tragfähigkeit nach sich. Risse stellen eine

⁷⁷³ Vgl. Kap. 8.3.

⁷⁷⁴ Ebenso sichtbar beispielsweise bei Rottweil-Neufra (Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü19) oder in Landau an der Isar (Beschreibung im Katalog unter BY9): In diesem Beispiel wird das Wasser zu einem Ablauf durch den Bogen geleitet, die Linie der Entwässerungsebene ist deshalb entgegengesetzt geneigt als bei den anderen Beispielen (Abbildung 8.7).

Bedrohung dar, wenn dort Wasser eindringen und bei Frost zu Absprengungen führen kann oder wenn sich dort Pflanzen ansiedeln, die durch ihr Wurzelwachstum die Struktur stören (Abbildung 4.61). Ebenfalls eine Zerstörung des Tragwerks wird durch eindringenden Niederschlag über die Fahrbahn bzw. das (ehemalige) Gleisbett befürchtet. Sanierungskonzepte suchen hier nach Lösungen, die die Oberfläche abdichten.

Bei der Änderung der Anforderungen ist neben der Erhöhung der Lasten, Fahrzeuggeschwindigkeiten und Anzahl der Überfahrten eine Reihe an weiteren Szenarien zu beachten. Schwere Eingriffe in die Substanz und die Ästhetik einer Brücke ziehen im Allgemeinen Verbreiterungen nach sich, Beispiele dafür werden im Kap. 8.3 behandelt. Solche Erweiterungen der Fahrbahn können beispielsweise dann notwendig werden, wenn zusätzliche Fahrspuren oder Gleise, Fuß- oder Radwege bereitgestellt werden müssen. Ein weiteres Problem sind heutige Normungen. Deutlich wird dies etwa am Beispiel der Radwege: Bei heutigen Neubauten wird bei Nutzung durch Radfahrer eine Geländerhöhe von 1,30 m gefordert, bei Bestandsbrücken werden 1,20 m geduldet [Bundesanstalt für Straßenwesen 2013, S. 4]. Weitere Regelungen betreffen Pfostenabstände, Füllungen und Handlaufabmessungen, insbesondere aber statische Anforderungen. Historische Brückengeländer, insbesondere diejenigen von Eisenbahnbrücken, erfüllen diese Forderungen in den seltensten Fällen, so dass hier meist Anpassungen notwendig sind. Speziell bei relativ niedrigen Bestandsbetonbrüstungen wird hier oft massiv eingegriffen.

8.3 Bewertung

In diesem Kapitel soll anhand von ausgewählten Beispielen die Problematik von Eingriffen an Brücken erläutert werden. Hieraus sollen Kriterien erarbeitet werden, deren Einhaltung bei einer Sanierung oder Ertüchtigung wichtig ist. Abschließend werden diese an einigen Positivbeispielen diskutiert.

Oberflächenbearbeitungen: Die zuvor beschriebenen Schäden an Brücken – Risse und Abplatzungen – sowie die oft unerwünschte Optik von Betonbrücken werden häufig durch vollflächige Bearbeitungen der Ansichtsflächen „saniert“. Ein besonders eindrückliches Beispiel einer vollflächigen Überarbeitung sind die Bauwerke des Vanne-Aquädukts (Abbildung 8.8).⁷⁷⁵ Diese Konstruktion, die in den Jahren 1867–1874 zur Sicherung der Pariser Wasserversorgung erbaut wurde, verläuft über 173 km durch das östliche Einzugsgebiet von Paris.⁷⁷⁶ Der Aquädukt verläuft größtenteils unterirdisch; mehrere Bogenreihen mit einer Gesamtlänge von 16,6 km führen die Wasserleitung über Senken und Täler. Während ein Großteil der Aquäduktbauten noch in Bruchsteinmauerwerk hergestellt wurde, wurden insbesondere die größeren Bogen in Stampfbeton ausgeführt. Diese Bogen sind damit die ersten weitgespannten Bogen aus Beton überhaupt und stellen damit Denkmale allerersten Ranges dar. Eine Vor-Ort-Untersuchung sämtlicher Bauwerke des Vanne-Aquädukts zeigte, dass sich inzwischen nur noch ein sehr geringer Teil der Bauwerke nahe dem Originalzustand befindet: Die bis zu 40 m weiten Bogen der Flussquerung bei Pont-sur-Yonne wurden bereits im Zweiten Weltkrieg zerstört und in

⁷⁷⁵ Vgl. Kap. 4.2.

⁷⁷⁶ Vgl. [Belgrand 1882].

den Nachkriegsjahren durch Stahlbetonbauwerke ähnlicher Optik ersetzt. In den letzten Jahren unterzog das öffentliche Wasserversorgungsunternehmen „L'eau de Paris“, der Eigentümer der Bauten, die verbliebenen großen Stampfbetonbogen einer eingehenden „Sanierung“: Dabei wurden sämtliche Oberflächen mit Pressluftschlämmern abgearbeitet und mit einem pastellgelben Putz überzogen, in dem die ursprüngliche Gliederung nachgezeichnet wurde [Eau de Paris 2013b, S. 8]. Der Bauherr nennt dies „*offrir une seconde jeunesse aux aqueducs*“, also den Aquädukten eine zweite Jugend schenken [Eau de Paris 2013a, S. 16]. Abbildung 8.8 zeigt den heutigen Zustand: Sämtliche Spuren des Herstellungsprozesses und des verwendeten Materials sind unwiederbringlich verloren. Übrig geblieben ist ein Platzhalter, der lediglich in seinen Abmessungen an das einstmals herausragende Betonbauwerk erinnert.

Auch in Deutschland gibt es zahlreiche Fälle von Oberflächenbearbeitungen: Die Abbildung 8.9 zeigt ein Brückenbauwerk der Bahnstrecke Mühldorf–Freilassing in der Nähe von Garching a. d. Alz. Die Bogenzwickel sind durch horizontale Linien⁷⁷⁷ gegliedert, deutlich sichtbar zeichnen sich die Gelenke und die darüber liegenden Dilatationsfugen ab.⁷⁷⁸ Ein ähnliches, etwas kleineres Bauwerk auf derselben Linie, nur wenige hundert Meter entfernt, weist die in Abbildung 8.10 gezeigte Ansicht auf: Die komplette Brücke wurde mit einem Überzug aus Spritzbeton versehen. In der Oberfläche zeichnen sich sogar die Dilatations- und Gelenkfugen noch leicht ab.

Als weitere Beispiele kompletter Oberflächenbearbeitungen können hier der Wilhelm-Steg⁷⁷⁹ in Erfurt (Abbildung 8.11: erbaut 1898, überarbeitet 2002) sowie die Zufahrt zur Fabrikantenvilla der Papierfabrik in Langenbrand⁷⁸⁰ (Abbildung 8.12: erbaut 1910, überarbeitet 2003) genannt werden. Dergleichen gibt es jedoch zahlreiche mehr. Der „Nutzen“ von Oberflächenbearbeitungen ist in der Regel rein optisch zu bewerten. Während bei einer Eisenbetonbrücke ein Spritzbetonüberzug etwa noch zur Erhöhung der Bewehrungsüberdeckung notwendig sein kann, so ist dies im Falle von Stampfbeton selbsterklärend überflüssig. In technischer Hinsicht könnte noch das Schließen der Risse eine Oberflächenbearbeitung begründen, jedoch ist hierbei die Art des Risses zu beachten: Ist der Riss noch „aktiv“, so hilft das reine Überputzen nicht. Der Riss wird sich wieder öffnen. Bei Schwindrissen oder Stampffugen usw. ist die Gefahr für das Tragwerk jedoch gering, so dass man sich über den Sinn oder Unsinn einer solchen Maßnahme vorab klar werden muss.

Verbreiterung: Ein Beispiel für eine Verbreiterung ist die Doppelbrücke über die Iller in Kempten. Das ursprünglich als Eisenbahnüberführung erbaute Bauwerk wurde 1971 umgenutzt, 1984 erfolgte ein weiterer Umbau mit einer Verbreiterung⁷⁸¹ [TBAmtKE, Sign.

⁷⁷⁷ Die Gliederung durch horizontale Linien war zu dieser Zeit durchaus verbreitet. Vergleichbare Beispiele: Chemnitztalviadukt Chemnitz (1899), Illerbrücken Kempten (1903–1906), Isarbrücke Unterföhring (1905, nicht erhalten), Nürnberg-Schniegling (1909–1910); vgl. Kap. 7.5.2.

⁷⁷⁸ Der Überbau wurde ersetzt, denn die Konsolen zeigen nicht das zu dieser Zeit übliche Bild (vgl. beispielsweise die Illerbrücke in Lautrach oder die Rottachbrücke in Kempten-Rothkreuz).

⁷⁷⁹ Beschreibung im Katalog unter D15.

⁷⁸⁰ Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü14.

⁷⁸¹ Ein in den Unterlagen des Amtes für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten vorhandenes, undatiertes Foto zeigt die Illerbrücke bereits als Straßenbrücke, jedoch noch ohne Verbreiterung. Auf diesem Foto sind

keine]. Diese Verbreiterungen nehmen heute die Fußwege auf. Die Abbildung 8.13 zeigt diese Doppelbrücke in einer Ansicht: Die ursprünglich vorhandenen Konsolen wurden entfernt, Kragplatten aufgebracht. Die Verbreiterung wirkt in diesem Beispiel vergleichsweise zurückhaltend, da die Abmessungen der Brücke sehr groß sind.

Auf Abbildung 8.14 ist die Reichenbachbrücke über die Isar in München zu sehen, die im Rahmen des Münchner Brückenbauprogramms⁷⁸² in den Jahren 1902–1903 von der Firma Sager und Woerner erbaut worden ist. Im Jahr 1964 wurde die Brücke massiven Eingriffen unterzogen, unter anderem einer Fahrbahnverbreiterung von 12 auf 18 m unter Verlust der Betonbrüstungen [Hackelsberger 1981, S. 54]. Die aufgebrachte Betonplatte diente des Weiteren auch zur statischen Ertüchtigung der Brücke [Hackelsberger 1981, S. 54]. In der Abbildung 8.15 ist eine historische Ansicht der Brücke zu sehen. Der Vergleich zeigt: Die massive Betonplatte kragt heute deutlich über den historischen Brückenkörper, die Betonbrüstungen wurden entfernt.⁷⁸³

Noch einschneidender sind die Eingriffe am Pont de la Coulouvrenière in Genf (Abbildung 8.16). Der Vergleich mit der historischen Abbildung 8.17 zeigt die Unterschiede: Die Brücke weist eine beidseitige Verbreiterung von 1970 auf. Diese massive Konstruktion ändert die Optik des Bauwerks einschneidend, weiterhin fielen dieser Maßnahme die Brüstungen und die mittig angebrachten vier Obelisken zum Opfer. Bei näherer Betrachtung fällt zusätzlich auf, dass auch die komplette Oberfläche des Bauwerks überarbeitet wurde: Nach der bauzeitlichen Beschreibung wurde die Brücke in verschiedenen Gesteinsarten, der Bogen jedoch mit künstlichen, bossierten Betonsteinen verkleidet⁷⁸⁴ [Berthier 1896, S. 132]. Die heutige Ansicht zeigt, dass sämtliche Verkleidungen entfernt und durch eine einheitliche, glatte Gesteinsart ersetzt wurden.

Eine ähnliche Vorgehensweise zeigen die beiden Brücken über den Loisach-Isar-Kanal bei Wolfratshausen-Gelting⁷⁸⁵ (Abbildung 8.18; Abbildung 8.19). Während die Abbildung 8.18 den mehr oder weniger ursprünglichen Zustand der Brückengruppe mit Betonbrüstungen und Sichtbetonoberflächen zeigt, kann man in Abbildung 8.19 die massive Überarbeitung der dortigen Bahnweg-Brücke sehen. Die Betonbrüstungen wurden entfernt, um eine Verbreiterung sowie den Einsatz eines Stahlgeländers zu ermöglichen. Darüber hinaus wurden sämtliche Oberflächen vollflächig überarbeitet.

noch die originalen Konsolen und vermutlich sogar das bauzeitliche Geländer vorhanden [Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten, Sign. keine]. Beides dürfte damit erst 1984 verloren gegangen sein.

⁷⁸² Vgl. Fußnote 366.

⁷⁸³ Weiterhin wurden sechs im Jahre 1925 ergänzte Steinfiguren entfernt, diese sind jedoch auf dem historischen Bild noch nicht zu sehen [Rädlinger 2008, S. 200]. Die ausführende Firma Sager & Woerner kommentierte die Verbreiterung in einer Firmenschrift von 1964: „60 Jahre lang waren diese Brücken Denkmäler Münchens. Nun zerstören die Erfordernisse des Verkehrs die alte Form. Die Gewölbe und Stirnmauern aus handbehauenen Stein werden von auskragenden Stahlbetonplatten überschattet. An Stelle eigenwilliger Brüstungen begrenzen ausdruckslose Eisengitter die Gehwege. An der Reichenbachbrücke wurde begonnen.“ [Sager & Woerner 1964, S. 108].

⁷⁸⁴ Original: „les bossage des grands arcs sont formés artificiellement d'éclats de pierre cimentés à même le béton de l'arc.“

⁷⁸⁵ Beschreibung im Katalog unter BY27.

Statische Ertüchtigung: In vielen Fällen bedeutet die nicht ausreichende Tragfähigkeit eines Brückentragwerks den Abriss und den Ersatzneubau. Wie beim soeben besprochenen Beispiel der Reichenbachbrücke wurde dort eine Spannbetonplatte aufgebracht, um die Tragfähigkeit von 24 auf 60 Tonnen zu erhöhen. Weiterhin erwartete man sich auf diese Weise eine Abdichtung des Brückenkörpers von oben [Rädlinger 2008, S. 200].

Ein Beispiel, bei dem eine andere Lösung angewandt wurde, ist die Gabsattelbrücke⁷⁸⁶ in München. Hierbei handelt es sich um eine von Theodor Fischer entworfene und 1901–1902 erbaute Brücke aus Eisenbeton. Sie verfügt über eine reiche Ausstattung. Der Eintrag in der Bayerischen Denkmalliste lautet: „*einbogiger Eisenbetonbau mit von Bronzevögeln bekrönten Obelisken am Bogenscheitel und mit von Eisengittern durchbrochenem Geländer, in Jugendstilformen (...)*“ [Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Eintrag Gabsattelbrücke]. Die Ertüchtigung erfolgte 1998 [Rädlinger 2008, S. 241] und wird in einer kurzen Notiz so beschrieben: „*Der alte Brückenbogen und die aufgesetzten Brückenstirnen bildeten eine verbleibende Schale, in die das neue Brückentragwerk zu setzen war. Das neue Brückentragwerk ist eine Plattenbalkenbrücke, mit einer Stützweite von 22,50 m, auf massiven, neu erstellten Stahlbetonwiderlagern, die auf den Rücken der alten Bogenwiderlager gegründet sind. Der Brückenüberbau besteht aus Spannbeton-Fertigteilträgern mit Ortbetonergänzung der Fahrbahnplatte, sowie der End- und Feldquerträger.*“ [SPD Ortsverein München-Au]. Die Beschreibung zeigt, dass das ehemalige Tragwerk, also der Eisenbetonbogen, zwar noch vorhanden ist, jedoch nur noch als Hülle für die neue Brücke dient. Nach Auffassung der Verfasserin verliert ein solches Bauwerk durch die Ertüchtigungsmaßnahme den Status des Technischen Denkmals als Eisenbeton-Bogenbrücke,⁷⁸⁷ wobei die künstlerische Bedeutung davon unangetastet ist. Der Denkmalstatus insgesamt bleibt also begründbar.

Weitere Anforderungen: Ein außergewöhnliches Beispiel für erhöhte Anforderungen findet man in Dresden. Zur Überbrückung der Weißeritz wurden in den Jahren 1891–1892 sechs Brückenbauwerke von Dyckerhoff & Widmann erstellt [BWA, Sign. BWA F100, Nr. 664].⁷⁸⁸ Zwei davon überdauerten die Zeit (Abbildung 8.20). Nach dem verheerenden Hochwasser im Jahr 2002, das große Teile Dresdens überflutete [Umweltamt der Stadt Dresden 2006, S. 30], wurde bemängelt, das Durchflussprofil der Brücken sei nicht ausreichend [Umweltamt der Stadt Dresden 2007, o. S.]. In den Folgejahren wurden sie durch Neubauten ersetzt (Abbildung 8.21).⁷⁸⁹ Sicherlich kann man die Not der durch das Hochwasser geschädigten Anwohner verstehen, ob jedoch zukünftige Schäden aus derartigen Jahrhundert-Flutereignissen durch den Abriss historischer Brücken verhindert werden können, mag bezweifelt werden.

⁷⁸⁶ Beschreibung im Katalog unter BY18.

⁷⁸⁷ Vgl. ICOMOS Charta von Victoria Falls [ICOMOS 2003, 1.3].

⁷⁸⁸ Vgl. auch [N. N. 1892].

⁷⁸⁹ Der Bericht sagt auch, dass das Hochwasser schwere Schäden an den Brücken verursacht habe. Auf den Fotos sind lediglich im oberen Bereich der Konsolen Schäden erkennbar. Allerdings ist dies sicherlich keine ausreichende Grundlage für eine Beurteilung des Zustandes.

In Deutschland kam es in den letzten Jahrzehnten wiederholt zu vorbeschriebenen Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen sowie Abrissen, teilweise auch an Bauwerken, die bedeutende Aspekte der Entwicklungsgeschichte von Massivbrücken repräsentier(t)en.⁷⁹⁰ Insofern scheint eine Diskussion zum angemessenen Umgang mit diesem Bautypus unumgänglich.

Der erste Schritt muss immer die genaue Information der zuständigen Planer, Eigentümer und Denkmalpfleger beinhalten. Was sich wie eine Selbstverständlichkeit anhört, ist in der Praxis leider oftmals nicht der Fall. Als Beispiel sind hier Aussagen aus den Vorberichten zur Sanierung des Teufelsgrabenaquäduktes in Grub bei München zu nennen, die zwar in der Zeitung erschienen, jedoch sicherlich nicht von den jeweiligen Journalisten „erfunden“ wurden.⁷⁹¹ So ist in einem Artikel von 2012 zu lesen: *„Sicher ist jetzt schon: Das Denkmal besteht aus purem Stampfbeton, ein stützendes Metallskelett im Inneren – so wie es heute üblich wäre – fehlt, weshalb es auf wackeligen Füßen steht.“* [Kadach 2012]. Ein weiterer Zeitungsartikel weiß zur grundsätzlichen Standfähigkeit von Stampfbetonbauwerken gar zu berichten: *„Es war damals vielleicht noch nicht bekannt, aber solche Betonformationen finden in ihrem Inneren keinen Halt und werden daher mehr und mehr brüchig.“* [Zessack 2012].⁷⁹² Durch solche Aussagen wie auch durch die momentan herrschende Grundsatzdiskussion um den Gesamtzustand von Deutschlands Brücken⁷⁹³ begünstigt, herrscht eine Verunsicherung in der Bevölkerung. Da die Entscheidungsträger oftmals keine Experten sind, reichen selbst kleine Schäden aus, um ganz grundlegende Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen in die Wege zu leiten. Häufig sind die Notwendigkeit und insbesondere der Umfang solcher Maßnahmen zweifelhaft.

Deshalb muss durch den zuständigen Ingenieur zunächst eine genaue Bestandsaufnahme erfolgen:⁷⁹⁴ Dazu gehören ein Aufmaß des Bauwerks mit einer genauen Kartierung sämtlicher Befunde und Schäden wie Abplatzungen und Risse usw. In den wenigsten Fällen werden ausschließlich visuelle Begutachtungen ausreichend sein. Vertiefende Untersuchungen beispielsweise zu Materialeigenschaften (z. B. Probennahme und deren Untersuchung) oder Rissverhalten (z. B. Gipsmarken)⁷⁹⁵ komplettieren das Werkzeug für die genaue Analyse des Tragwerks. Erst dann sind die Grundlagen für den Entwurf eines Sanierungs- oder Ertüchtigungskonzeptes erstellt. Bei der Wahl der Prüfmethode ist auf eine möglichst geringe Schädigung des Bauwerkes zu achten (zerstörungsfreie oder zerstörungsarme Prüfung). Abbildung 8.22 zeigt die Stelle der Materialprobenentnahme an der Illerbrücke in Lautrach: Ob die Größe des Bohrkerns wirklich notwendig ist, soll an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden, die Markierung desselben sowie der

⁷⁹⁰ Vgl. beispielsweise das in Kap. 1.1 beschriebene Beispiel der Bodebrücke in Staßfurt.

⁷⁹¹ Bzw. wurden diese Aussagen zumindest bis heute nicht von den zuständigen Ingenieuren revidiert, vgl. Fußnote 792.

⁷⁹² Eine entsprechende Aussage diesbezüglich findet sich noch im Herbst 2014 in einem Zeitungsartikel: *„Es steht noch heute – obwohl es bereits um das Jahr 1890 aus purem Stampfbeton und ohne stützendes Metallskelett im Inneren erbaut wurde.“* [Hager 2014].

⁷⁹³ Vgl. beispielsweise [Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2014].

⁷⁹⁴ Vgl. dazu die Prinzipien der Charta von Victoria Falls [ICOMOS 2003].

⁷⁹⁵ Eine ausführliche Zusammenstellung der üblichen Untersuchungs- und Instandsetzungsmethoden bei Massivbrücken liefert [Vockrodt et al. 2003], wiewohl Verfasserin die dort vorgestellten, ausgeführten Beispiele durchaus kritisch bewertet.

verschiedenen Teile des Bauwerks mit rotem Spray zeugt jedoch in jedem Falle von denkmalpflegerischer Ignoranz.

Bei der Präzisierung des Konzeptes wiederum sind die grundlegenden denkmalpflegerischen Grundsätze einzuhalten. Die Charta von Venedig, die im Jahre 1964 die internationalen Standards zum Umgang mit Denkmälern zusammenfasste [Hubel 2006, S. 129–130], formuliert das Hauptziel eines denkmalgerechten Umgangs wie folgt: *„Ziel der Konservierung und Restaurierung von Denkmälern ist ebenso die Erhaltung des Kunstwerks wie die Bewahrung des geschichtlichen Zeugnisses.“* [Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland 2004, Art. 3]. Präzisiert wurden die Grundsätze der Charta von Venedig in den im Jahre 2003 in Victoria Falls, Zimbabwe, verfassten Prinzipien für die Beurteilung, Konservierung und konstruktive Instandsetzung von Denkmälern [ICOMOS 2003]. In Hinsicht auf die hier betrachteten Brücken seien folgende Punkte herausgegriffen:⁷⁹⁶

3.2 Vorbeugende Unterhaltsmaßnahmen sind die beste Therapie.

3.4 Maßnahmen dürfen nicht durchgeführt werden solange sie nicht als unerlässlich nachgewiesen sind.

3.5 Jeder Eingriff sollte verhältnismäßig in Bezug auf die gesetzten Ziele sein, also möglichst minimal um Sicherheit und Dauerhaftigkeit zu garantieren mit dem geringsten Schaden am Denkmal.

3.9 Wenn möglich sollten Maßnahmen reversibel sein, damit sie entfernt und durch geeignetere Maßnahmen ersetzt werden können, wenn neue Erkenntnisse gewonnen werden. Wo sie nicht komplett reversibel gestaltet werden können, sollten sie künftige Eingriffe nicht einschränken.

3.11 Die charakteristischen Merkmale des Bauwerks und seiner Umgebung, im originalen oder seitherigen Zustand, sollen nicht zerstört werden.

3.12 Jeder Eingriff sollte, soweit möglich, den Entwurf, die Handwerkstechniken sowie die historischen Werte der originalen oder seitherigen Zustände berücksichtigen und ein Zeugnis für die Zukunft erhalten.

3.15 Beschädigte Bauwerke sollten wenn möglich repariert und nicht ersetzt werden.

3.16 Schäden und Änderungen, solange sie einen Teil der Geschichte des Bauwerks darstellen, sollen erhalten werden solange sie die Sicherheitsanforderungen nicht einschränken.

Nach dem Punkt 3.2 ist die beste Lösung, durch regelmäßigen Unterhalt keine nennenswerten Schäden am Bauwerk entstehen zu lassen. Dies ist jedoch oftmals ein „frommer Wunsch“. Insbesondere wenn Bauten nicht mehr in Nutzung sind, bedeutet dies das Ende regelmäßiger Wartung: Bei fehlender Funktion ist dem Eigentümer nur

⁷⁹⁶ Original in englischer Sprache, Übersetzung durch die Verfasserin.

schwerlich die Pflege der Objekte zuzumuten. Das Beispiel der Arnstädter Gerabrücke⁷⁹⁷ zeigt diesen Fall (Abbildung 4.61): In unmittelbarer Nähe findet sich heute eine wesentlich breitere moderne Brücke. Die Lieboldsche Konstruktion von 1880 ist inzwischen gesperrt, eine Nutzung ist nicht mehr vorgesehen. Dadurch bleiben sämtliche Wartungsarbeiten am Bauwerk, wie etwa das Entfernen des Bewuchses, aus. Die Wurzeln zerstören nach und nach das Gefüge. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis dieses Bauwerk als „einsturzgefährdet“ eingestuft und ganz aufgegeben, dann sogar abgerissen wird.⁷⁹⁸

Insofern ist es für den dauerhaften Erhalt ein Erfordernis, das Denkmal einer Nutzung zuzuführen. Eine Brücke ist ein Gebrauchsobjekt und keine Statue. Gemäßigte Eingriffe sind zu tolerieren, wenn es im Gegenzug zu einer sinnvollen Nutzung kommt. Es bleibt die Frage, was als tolerierbar eingestuft werden kann.

Dazu sei die Rottachbrücke in Ahegg näher betrachtet (Abbildung 8.23): Das Bauwerk der ehemaligen Bahnstrecke von Kempten nach Isny dient heute als Überführung eines Rad-Wander-Weges. Bei der Umnutzung wurde die Brücke mit einer neuen Betonplatte abgedeckt; diese dient auch der Befestigung des neuen Geländers. Die Betonplatte entspricht in den Abmessungen in etwa dem originalen Zustand.⁷⁹⁹ Positiv an diesem Beispiel ist der Umgang mit dem Unterbau, insbesondere der Erhalt der Konsolen.⁸⁰⁰ Einige der Konsolen sind zwar erneuert. Sie fügen sich jedoch in das Bild ein, sind aber trotzdem als spätere Ergänzungen zu erkennen. Die abgeplatzten Kanten wurden belassen. Die Oberfläche zeigt nach wie vor sämtliche Spuren der Herstellung und des Materials. Hier wurden die notwendigen Maßnahmen, also die gesetzlich vorgeschriebene Ausbildung des Geländers, durchgeführt, ohne im Unterbau zu übertriebenen Maßnahmen zu greifen.

Für die nur wenige Kilometer entfernte Schwesterbrücke des Ahegger Bauwerks, die Rottachbrücke in Kempten-Rothkreuz, wurde während der Erstellung vorliegender Dissertation ein Sanierungskonzept entwickelt. Die Schäden sind mit denen der Ahegger Brücke vergleichbar und auch hier soll eine Umnutzung der aufgelassenen Strecke zum Bahntrassenradweg erfolgen. Am Bauwerk wurden Muster erstellt zur Sanierung der Kantenabplatzungen (Abbildung 8.24). Hierbei ist grundsätzlich zu bemerken, dass der in Ahegg vorhandene „Mut“, die Schäden einfach zu belassen, hier nicht aufgebracht wurde. Die angelegte Musterfläche zeigt zwei Konzepte: zum einen die Rekonstruktion der Kante, zum anderen das Schließen der Bruchfläche. Gemäß dem oben genannten Punkt 3.16 der ICOMOS-Prinzipien zieht die Verfasserin zweite Lösung vor. Hier wird lokal und kleinflächig saniert, ohne dabei die Geschichte des Bauwerks mit seinen Schäden zu beschönigen.

⁷⁹⁷ Vgl. Kap. 4.5.

⁷⁹⁸ Ähnliche Beispiele: Wertachbrücke Nesselwang (Beschreibung im Katalog unter BY19), Chemnitztalviadukt in Chemnitz sowie die Bauten der Heubergbahn.

⁷⁹⁹ Vgl. dazu die Ansicht der noch unsanierten Schwesterbrücke in Kempten-Rothkreuz (Abbildung 8.3).

⁸⁰⁰ Bei den meisten Brücken gingen diese Konsolen verloren, vgl. z. B. Illerbrücken in Kempten, Alzbrücke in Garching usw.

Als weiteres Beispiel für einen gelungenen Eingriff dient die Pegnitzbrücke in Nürnberg-Schniegling (Abbildung 7.38):⁸⁰¹ Das Bauwerk wurde für die Nürnberger Ringbahn zwischen Schniegling und Muggenhof gebaut. Bauunternehmer war die Firma Dyckerhoff & Widmann, ausgeführt wurden die Arbeiten in den Jahren 1909–1910 [Stegmann 2014, WVZ 299]. Offensichtlich erlitt diese Brücke im Zweiten Weltkrieg die Bombardierung eines Pfeilers, wodurch die benachbarten Bogen ebenfalls zerstört wurden. Den Wiederaufbau dieses zerstörten Teils kann man bis heute an dieser Brücke erleben: In Abbildung 8.25 ist die westliche Baufuge erkennbar, in der Abbildung 8.26 die östliche. Die in beiden Abbildungen links liegenden originalen Teile verfügen über eine gestockte Oberfläche mit scharriertem Randschlag. Der rekonstruierte Teil zeigt die Schalbrettandrücke und verzichtet auf eine nachträgliche steinmetzmäßige Bearbeitung. Ebenso ist die Rekonstruktion des zerstörten Teils an der Ausbildung der Konsolen sichtbar (Abbildung 8.27). Auch diese verfügen im Original über die steinmetzmäßige Nachbearbeitung, in der Rekonstruktion über sichtbare Schalbrettandrücke. Nur bei genauem Hinschauen erschließt sich dem Betrachter dieser Teil der Bauwerksgeschichte. Die Erneuerung des zerstörten Brückenteils fügt sich bestens in das Gesamtbild, ohne dabei Originalität vorzutäuschen. Dieses Beispiel ist damit auch ein beeindruckendes Beispiel positiver Nachkriegsdenkmalpflege bzw. des denkmalgerechten Wiederaufbaus in Bayern.

Die Brücke weist auch Risse auf (Abbildung 8.28): Ungefähr in den Viertelpunkten des „alten“ Bogens ziehen sich diese durch die Bogenzwickel. Sie wurden sichtbar geklammert. Die Notwendigkeit einer solchen Verklammerung mag bezweifelt werden, denn der Grund für diese Risse ist naheliegend. Durch das Überfahren der Züge wird der Bogen bei jeder Passage halbseitig belastet. Auf diese Weise wird der gegenüberliegende Bogenteil verstärkt auf Biegung beansprucht. Diese Biegung konnte durch den Bogen aufgenommen werden, weil dies bei der Berechnung berücksichtigt wurde.⁸⁰² Die Bogenzwickel konnten jedoch die entstehenden Zugspannungen nicht aufnehmen und rissen durch. Verschärft wird dieses Problem noch durch eine Außerkraftsetzung der Gelenke, wie man sie an der Schnieglinger Brücke vermuten kann: Auch dieser Bogen hat Gelenke mit Bleiplatten. Über die Jahre sind jedoch die Kämpfergelenke, die sich bei üblicher Belastung oben öffnen, mit Schmutz usw. gefüllt und damit außer Funktion gesetzt worden. Die Belastungen des Bauwerks bleiben jedoch und so sucht sich der Bogen eine neue Bewegungsmöglichkeit, die in diesem Fall die Zwickel nochmals reißen lässt.

Diese Problematik war insbesondere bei gelenklosen Bogen bekannt. Ein im Jahre 1897 verfasster Artikel über die Auswirkung von Temperaturveränderungen auf Mauerwerksbogen von Johann Hermanek erläutert die Vorgänge: Der Bogen verlängert sich bei erhöhter Temperatur im Sommer und verkürzt sich im Winter. Auf diese Weise hebt bzw. senkt sich der Scheitel. Die Zwickelbereiche können diese Bewegungen aber nicht mitmachen. Als Lösung des Problems schlug er vor: *„Soll die Beweglichkeit des Bogens durch die Stirnmauerungen nicht behindert werden, so müssen bei größeren Gewölben in letzterer verticale Fugen angeordnet werden, u. zw. mindestens im Scheitel und*

⁸⁰¹ Ein Paper zu den denkmalpflegerischen Aspekten der Pegnitzbrücke-Schniegling wurde vorveröffentlicht in [Veihelmann 2015b].

⁸⁰² Vgl. Kap. 7.6.

in je ein Viertel der Stützweite; dadurch wird die Entstehung von Rissen in der Stirnmauer thunlichst vermieden. [Hermanek 1897, S. 427]. Dass dies auch bauzeitlich hin und wieder so ausgeführt wurde, zeigt das Beispiel der Rampenbogen der Hackerbrücke in München (Abbildung 8.29). Im Ausführungsplan der Hackerbrücke sind diese Fugen bereits gezeichnet (Abbildung 7.23) und wurden während des Baus offen gelassen, um somit die nachträgliche Rissbildung zu verhindern.

Durch die Außerkraftsetzung der Kämpfergelenke der Schnieglinger Brücke nähert sich ihr Tragsystem dem des eingespannten Bogens: Auch hier führen die Temperaturänderungen und die Lasten zu Bewegungen und damit auch zu einem Reißen der Zwickel. Dass diese Risse bei der Nürnberger Brücke bereits bauzeitlich – mindestens jedoch vor der Teilzerstörung – aufgetreten sein müssen, zeigt wiederum der rekonstruierte Teil: Dort wurden diese Fugen beim Bau nämlich offen gelassen, man reagierte also auf die festgestellten „Mängel“ des originalen Teils. Die Abbildung 8.30 zeigt diese kontrolliert hergestellte Fuge, wenngleich sie durch den Bewuchs schwer zu erkennen ist. Diese Risse stellen also keinesfalls eine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit dar. Heute wird diese Brücke mit der Bauzustandsnote 4,0 bewertet und ist damit vom Abriss stark bedroht.⁸⁰³

Ein der Pegnitzbrücke ähnliches „Schadensbild“ zeigt im Übrigen auch die Alzbrücke in Trostberg (Abbildung 8.31). Die sich noch voll in Betrieb befindliche Eisenbahnbrücke wurde als Dreigelenkbogen mit Bleieinlagen ausgeführt. Sie weist in den Viertelpunkten zusätzliche Risse im Zwickel auf (Abbildung 8.32). Auch hier ist hauptsächlich die Last aus dem Überfahren durch die Züge verantwortlich: Dadurch werden die Bogenteile auf Biegung beansprucht, der Zwickel reißt auf.

Ebenso ungefährlich sind die Risse in den Bogenzwickeln der Kemptener Illerbrücke zu werten (Abbildung 8.33): Auch diese lassen sich sehr einfach erklären. Die Zwickel dieses Bauwerks wurden mit ovalen Hohlkörpern versehen, um Gewicht zu sparen und um die rückwärtige Zugänglichkeit der Gelenke zu gewährleisten (Abbildung 8.34). Die außen sichtbaren Risse bilden diese Hohlräume nach. Auch hier ist keine Gefährdung der Standsicherheit vorhanden, was von den zuständigen Ingenieuren offensichtlich so erkannt und richtigerweise nicht behoben wurde.

Ebenso erwähnenswert wie außergewöhnlich ist der Umgang mit der Eyachbrücke in Owingen. Die Nutzung der Brücke durch überbreite und schwere Landwirtschaftsfahrzeuge hatte nach einem Zeitungsartikel zu Rissen im Bauwerk geführt [Selinka 2012]. Da man die Mittel für eine Instandsetzung nicht aufbringen konnte und wollte, ist die Brücke heute durch Leitplanken in der Breite beschränkt [Selinka 2013; Abbildung 8.35]. Für die landwirtschaftlichen Fahrzeuge wurde ein vorhandener Wiesenweg ausgebaut. Die Brücke wurde keinerlei Eingriffen unterzogen.

Insbesondere dieses letzte Beispiel zeigt, dass Lösungen bei historischen Brücken auch neue Wege beschreiten können und sollen, wenn damit das Brückendenkmal in seiner Gestalt erhalten werden kann.

⁸⁰³ Vgl. die Homepage von Dr. Anton Hofreiter, MdB, der dort die „nicht sanierungsfähigen“ Brücken lokalisiert (<http://toni-hofreiter.de/bahnbrueckenbayern.php>, zuletzt geprüft am 20.03.2015).

8.4 Eisenbahnbrücke über die Iller in Lautrach⁸⁰⁴

Ein Beispiel, bei dem im Laufe des Verfassens vorliegender Arbeit Diskussionen um den baulichen Zustand stattfanden, ist die Illerbrücke in Lautrach. Die historische Entwicklung wie auch die aktuelle Diskussion um die Sanierung werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

Um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert erlebte Deutschland einen zweiten Eisenbahnboom. Nachdem im Laufe des 19. Jahrhunderts die Haupttrassen der Eisenbahn hergestellt worden waren, wurden zwischen 1890 und dem Ersten Weltkrieg zahlreiche Neben- und Stichstrecken erbaut, um auch kleinere Ortschaften an das überregionale Bahnnetz anzuschließen. Die Bahnbrücke über die Iller zwischen Lautrach und Illerbeuren (Abbildung 8.36) ist ein durchaus typischer Vertreter dieser Zeit: Im Rahmen der Nebenbahnlinie Memmingen–Legau im Jahr 1903 erbaut und 1904 in Betrieb genommen, verlor diese Strecke in der Nachkriegszeit an wirtschaftlicher Bedeutung und wurde schließlich 1972 eingestellt.⁸⁰⁵ Nachdem die Brücke von der Bahn nicht mehr genutzt wurde, übergab diese das Bauwerk in den Besitz des Landkreises Unterallgäu [Landratsamt Unterallgäu 2013]. Seit vielen Jahren als Rad- und Wanderweg genutzt, steht es heute unter Denkmalschutz.

Die Planung für die Brücke über die Iller in Lautrach geschah in etwa zeitgleich mit derjenigen für die Illerbrücken in Kempten. Verantwortlich in beiden Projekten war das Ingenieurbüro der Generaldirektion der Königlich Bayerischen Staatseisenbahnen bzw. dessen Oberbauinspektor Ferdinand Beutel.⁸⁰⁶ Dieser schrieb in einem sehr ausführlichen Artikel [Beutel 1903; 1904], für beide Maßnahmen seien ursprünglich eiserne Brücken vorgesehen gewesen. Durch den Fortschritt in der Zementindustrie jedoch, der die Herstellung von Beton in verschiedenen Festigkeiten je nach Bedarf erlaube und der es ermöglicht habe, die Eigenschaften hinsichtlich Festigkeit, Elastizität und Temperaturendeckung genauestens zu kennen, seien Betonbrücken herstellbar, die denen aus Werkstein bezüglich Sicherheit und Unterhalt nicht nachstehen, dagegen geringere Kosten verursachen [Beutel 1903; 1904, S. 410–411]. Im Vergleich mit den eisernen Brücken seien die Einsparungen in der Herstellung wie auch im Unterhalt noch erheblicher [Beutel 1903; 1904, S. 411].

Für die Lautrachener Brücke waren ursprünglich bei Ausführung in Eisen 110.000 M veranschlagt, wohingegen die projektierte Betonbrücke mit 91.000 M kalkuliert wurde. Hierbei waren die erheblichen Unterhaltskosten bei Verwendung einer eisernen Konstruktion und auch deren als wesentlich geringer eingeschätzte Lebensdauer noch gar nicht angesetzt [Beutel 1903; 1904, S. 411]. Die Entscheidung für die Verwendung von

⁸⁰⁴ Der Inhalt dieses Kapitels wurde in stark verkürzter Form vorveröffentlicht in [Veihelmann (Veröffentlichung voraussichtlich 2015)].

⁸⁰⁵ Zur ausführlichen Beschreibung der Geschichte der Lokalbahn Memmingen–Legau vgl. [Baum 1969].

⁸⁰⁶ Seine Signatur ist auf den Plänen der Kemptener Brücken zu finden [Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten, Sign. keine, gleichlautende Aussage in Waibel 1904, S. 260], die Pläne der Lautrachener Brücke sind nur in Form von Publikationen aufgefunden worden, diese jedoch ohne Signatur. Dagegen gibt es in [L. (Liebold) 1904, S. 441] den Hinweis auf die Generaldirektion, ohne jedoch namentlich auf Ferdinand Beutel zu verweisen. [Séjourné 1913d, S. 164] nennt ausdrücklich Beutel als Ingenieur.

Stampfbeton wurde zudem noch durch das Vorkommen geeigneten Sand-, Kies- und Steinmaterials in der Umgebung der Baustelle begünstigt, lediglich der Zement musste über größere Entfernungen transportiert werden. Dementsprechend wurde für die Brücke ausschließlich Stampfbeton in verschiedenen, den jeweiligen Anforderungen angepassten Mischungsverhältnissen verwendet [Beutel 1903; 1904, S. 411]. Die befürchteten Gefahren des Unterspülens eines Flusspfeilers sowie des Aufstauens der Wassermengen insbesondere bei Hochwasser bedingten den Entwurf einer einbogigen Konstruktion mit einer Lichtweite von 59 m [Beutel 1903; 1904, S. 411].

Nach Beutels Beschreibung war in der Planung die im Vergleich zum Werkstein hohe Temperatúrausdehnung besonders zu berücksichtigen: Dieser Einfluss spiele bei freiliegenden Betonbogen eine noch größere Rolle. Demgemäß erfahre der Scheitel der Lautracher Brücke bei einem Temperaturunterschied von 40° C Hebungen und Senkungen von insgesamt 4 cm. Dieses Phänomen gekoppelt mit der großen Stützweite sei der Grund für den Einsatz von Gelenken bei dieser Brücke. Für die Lautracher Brücke wurden Wälzgelenke aus Stahlguss gewählt, deren Berührungsfläche bis mindestens 5 mm Tiefe gehärtet wurden [Beutel 1903; 1904, S. 411]. Für diese Wahl und gegen die Steingelenke führte Beutel mehrere Gründe an: Stahlgelenke seien leichter und billiger herstellbar und lassen sich genauer einrichten als Steingelenke; durch die geringen Abmessungen seien Stahlgelenke besser zugänglich und können somit leichter revidiert, gereinigt und unterhalten werden; zudem habe er Bedenken beim Einsatz von Steingelenken, deren Berührungsfläche weitaus größer gewählt werden müsse als beim Einsatz von Stahl, dass die dadurch entstehenden Reibungswiderstände Nebenspannungen im Beton erzeugen oder sogar ein Spalten der Gelenkquader eintreten könne [Beutel 1903; 1904, S. 412]. Um des Weiteren Risse im Überbau zu verhindern, wurden Dilatationsfugen von mäßiger Dicke vorgesehen, die bis zur Oberkante durchreichen [Beutel 1903; 1904, S. 411]. Die Brücke wurde mit sichtbarer Betonoberfläche geplant, da Beutel bei den unterschiedlichen Ausdehnungseigenschaften von Beton und Werkstein die Rissbildung in der Verkleidung befürchtete, zudem konnten auf diese Weise zusätzliche Kosten eingespart werden [Beutel 1903; 1904, S. 3].

Zur statischen Untersuchung [Beutel 1903; 1904, S. 412; S. 2] ist die in Kap. 7.6 beschriebene Methode angewendet worden: Die Form des Hauptbogens wurde an die Stützlinie für den unbelasteten Bogen angepasst. Die Berechnung der größten Beanspruchungen im Bogen erfolgte dann mit Hilfe der graphischen Konstruktion der Belastungsscheiden. Im Bogen sollten Zugspannungen nicht zugelassen werden, die Stützlinien der ungünstigsten Belastungen sollten also im mittleren Drittel bleiben. Zur Erläuterung verwendete er Abbildung 8.37: Eine aufgebrachte Einzellast P erzeuge am Gesamtsystem zwei Auflagerreaktionen. In einem beliebigen Querschnitt $a-b$ bezeichnen die beiden Laststellungen P_1 und P_2 die Grenzlagen von P , bis zu denen keine Zugspannungen im Querschnitt $a-b$ auftreten. In der Realität liegen beide Grenzlaststellungen so nahe beieinander, dass man vereinfacht zumeist nur die mittlere betrachte [Beutel 1903; 1904, S. 412].

Diese mittlere Laststellung P bildet zugleich die Grenze, bis zu welcher eine Streckenlast reichen darf, wenn sie dabei in dem betrachteten Querschnitt den größten Ausschlag der Stützlinie und damit dessen ungünstigste Beanspruchung hervorrufen soll (Abbildung

8.38). Alle Lasten links dieser Last P vergrößern das Biegemoment im Querschnitt a–b, alle rechts von P liegenden Lasten verringern es [Beutel 1903; 1904, S. 412].

Mit Hilfe dieser Methode erhält man für jeden Querschnitt zwei Werte, jeweils am oberen und am unteren Kernrand, je nachdem die Last links oder rechts der zugehörigen Belastungsscheide aufgebracht wird [Beutel 1903; 1904, S. 2]. Die Abbildung 8.39 zeigt die vereinfachte Visualisierung dieser Berechnungsergebnisse, in Abbildung 8.40 ist die Bemessung der Illerbrücke dargestellt: Die in jedem Querschnitt aufgefundenen Maximal- bzw. Minimalbelastungen werden mit Linien verbunden. Diese so erhaltene Figur aus den zwei Grenzstützlinien stellt den Kern des Bogens dar. Aus diesen Angaben kann dann die Bogenstärke im betrachteten Querschnitt durch Verdreifachen des Abstandes ermittelt werden. Auf diese Weise erhält man eine Verdickung des Bogens, die umso stärker wird, je größer das Verhältnis der Verkehrslasten zum Eigengewicht und je größer das Pfeilverhältnis ist [Beutel 1903; 1904, S. 2].

Die Berechnungsergebnisse aus der Methode mit den Belastungsscheiden überprüfte Beutel mit jener der Einflusslinien: Es sei stets das doppelte Verfahren angewendet worden, „um alle Ungenauigkeiten oder Fehler zu vermeiden und mit Sicherheit auszuschliessen.“ [Beutel 1903; 1904, S. 2]. Um das Eigengewicht des Aufbaus zu verringern,⁸⁰⁷ sah Beutel Entlastungsbogen⁸⁰⁸ über dem Hauptbogen vor. Um Risse in diesen Aufbauten zu vermeiden wurde eine Verankerung über den Entlastungsbogen eingeplant [Beutel 1903; 1904, S. 2]. Diese Verankerung wurde in Form von sieben miteinander verlaschten Eisenbahnschienen, deren Enden gebogen waren, bewerkstelligt [L. (Liebold) 1904, S. 442, Abbildung 8.41].⁸⁰⁹

Ein bedeutender Teil des Planungsprozesses historischer Brücken war der Modellbau. Nur wenige dieser großformatigen Modelle sind erhalten. Bei der Lautracher Illerbrücke ist bekannt, dass sowohl zur Brücke als auch zum Lehrgerüst ein Modell gebaut wurde, Fotografien sind im Stadtarchiv Holzminden erhalten (Abbildung 8.42).⁸¹⁰ Das originale Gerüstmodell befindet sich heute im Besitz der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst in Holzminden und stammt vermutlich aus dem Frühjahr 1903.⁸¹¹

Für die Ausführung des Bauwerkes war die Firma Bernhard Liebold verantwortlich. Auch aus diesem Blickwinkel gibt es nochmals einen ausführlichen Artikel [L. (Liebold)

⁸⁰⁷ Bei der eingleisigen Lokalbahn wurden vergleichsweise geringe dynamische Lasten aus dem Eisenbahnverkehr erwartet [Beutel 1903; 1904, S. 2] und damit war Beutel in der Wahl des Verhältnisses aus Eigengewicht und Verkehrslast entsprechend flexibel.

⁸⁰⁸ Nach Liebolds Aussage tat er dies auf Veranlassung der ausführenden Firma [L. (Liebold) 1904, S. 441].

⁸⁰⁹ Eine ähnliche Verstärkung wurde bei der Donaubrücke in Inzigkofen beschrieben: „Noch ist zu erwähnen, daß in den Gewölbchen über den ersten Spandrillräumen je 4 Eisenbahnschienen von 90 cm Länge einbetoniert sind, um diese Gewölbe für den Fall zu verstärken, daß bei Temperaturendehnungen die Fahrbahn von den Rollenunterlagen sich etwas abheben sollte.“ [Leibbrand 1895/96, S. 76]. Mit 90 cm Länge sind diese Eisenbahnschienen jedoch nur für das erste Zwickelgewölbe gedacht.

⁸¹⁰ Ebenso ist eine Fotografie des Gerüstmodells der schiefen Brücke über die Zschopau in Scharfenstein, 1884, erhalten; vgl. Katalog unter Sa24.

⁸¹¹ Bernhard Liebold erhielt den Auftrag zum Bau der Brücke erst Ende April 1903, die Bauarbeiten begannen bereits Mitte Mai desselben Jahres [L. (Liebold) 1904, S. 443].

1904].⁸¹² Nach den Gründungsarbeiten erfolgte im Sommer 1903 der Aufbau des Lehrgerüsts: Auf eingerammten Pfählen wurde das zweistöckige Lehrgerüst errichtet. Es stand auf Schraubenspindeln, die im Verlauf der Bauarbeiten jedoch durch eingespannte Keile entlastet wurden. Der Hauptgrund hierfür waren die erwarteten hohen dynamischen Belastungen aus dem Stampfen des Betons: Bei der Berechnung wurde dies durch einen Sicherheitsfaktor 1,5 zu den Gewölbelasten berücksichtigt [L. (Liebold) 1904, S. 453]. Sehr ausführliche Untersuchungen wurden in diesem Rahmen zu der Druckfestigkeit senkrecht zur Faser beanspruchter Schwellen beschrieben. Die beim Bauunfall der Corneliusbrücke⁸¹³ in München gemachten Erfahrungen fanden direkten Eingang in die Lehrgerüstplanung der Brücke in Lautrach. Auch Beutel veranlasste dementsprechend ausführliche Materialtests mit dem verwendeten Gerüstholz insbesondere zur Beanspruchbarkeit senkrecht zur Faser [Beutel 1903; 1904, S. 3]. In der Ausführung des Gerüsts schlugen sich die Untersuchungsergebnisse dahingehend nieder, dass vermieden wurde, Ständer und Druckstreben direkt auf die Schwellenhölzer aufzustellen. Vielmehr wurden zwischen diese Bauteile Hartholzklötze eingefügt und diese mittels Doppelzangen in ihrer Lage fixiert. An den Stellen, an denen selbst die Hartholzklötze eine zu hohe Beanspruchung erhielten, wurden U-förmige Eisenteile zur Druckverteilung verwendet [L. (Liebold) 1904, S. 453]. Insgesamt bezeichnete Liebold das Lehrgerüst als mit einem „*Uebermaß an Vorsicht*“ konstruiert, auf 1,31 m³ Gewölbeton komme 1 m³ Holz [L. (Liebold) 1904, S. 453]. Aus Angst vor seitlichem Schwanken des Lehrgerüsts durch erhöhte Strömung im Falle von Hochwasser erhielt das Lehrgerüst noch zusätzliche seitliche Sprieße, mit denen die Konstruktion verspannt wurde [L. (Liebold) 1904, S. 443]. Diese robuste Ausführung des Gerüsts kann sicherlich – zumindest teilweise – auf den bereits erwähnten Bauunfall der Corneliusbrücke und die daraus resultierende Angst vor dem Versagen eines Lehrgerüsts zurückgeführt werden.

Einige der Grundgedanken aus der bereits ausführlich beschriebenen Planungsphase sind am heutigen Bauwerk ablesbar. Wenngleich man vieles auch ohne die Publikationen durch genaues Hinsehen erkennen kann, so helfen diese zweifelsohne bei der genauen Einordnung: Die Bauforschung liefert Fakten, die Publikationen beantworten oft das „warum?“. Einige dieser am Bauwerk ablesbaren Spuren sollen hier exemplarisch vorgestellt werden. Abbildung 8.47 zeigt einen Ausschnitt der Ansichtsfläche des Bogens der Illerbrücke. Hier sind mehrere der im Folgenden besprochenen Phänomene erkennbar:

Die Brücke wurde wie bereits erwähnt aus Stampfbeton erstellt. Dabei wurden in diesem Fall die einzelnen Bestandteile des Betons – Zement, Sand, Kies und Wasser – maschinell gemischt und schichtenweise in Schalungen eingebracht. Um eine gute Verdichtung zu gewährleisten, wurde der Beton gestampft. Die Schichtdicken sind als waagerechte Stampffugen an der Oberfläche des Bauwerks ablesbar (in Abbildung 8.47 exemplarisch mit gelbem Pfeil markiert).

⁸¹² Der Artikel ist unterschrieben mit „Holzminden, den 24. Juli 1904. L.“. Die Verfasserin geht von der Autorenschaft Liebolds aus, auch wenn dies nicht gesichert ist.

⁸¹³ Vgl. Fußnote 321.

Oftmals wurden die Oberflächen bei solchen Brückenbauten noch bearbeitet, um Natursteinoberflächen vorzutauschen, bei der Illerbrücke blieb die Ansicht als Sichtbeton belassen. Die Publikation von Liebold bestätigt diese am Bauwerk zu machende Beobachtung: Es sei keine Nachbearbeitung der Oberflächen erfolgt, *„es blieb vielmehr das Aeußere der Brücke so, wie es aus der Schalung kam.“* [L. (Liebold) 1904, S. 443]. An der Brücke sind bis heute die Abdrücke der Schalbretter sowie Schalbrettstöße deutlich sichtbar. Die Schalbretttabdrücke verlaufen dabei polygonal entlang der Bogenlaibung (in Abbildung 8.47 exemplarisch mit rotem Pfeil markiert), die Schalbrettstöße senkrecht dazu (in Abbildung 8.47 exemplarisch mit blauem Pfeil markiert). Schalbrettstöße erkennt man daran, dass an dieser Stelle die Schalbretttabdrücke ihre Richtung ändern.

Die in Abbildung 8.47 exemplarisch mit grünem Pfeil markierten Fugen zeigen die Betonierabschnitte. Abschnittsfugen kann man von Schalbrettstößen unterscheiden, indem man die Richtung der Schalbretttabdrücke beobachtet: Bei Abschnittsfugen laufen die Schalbretttabdrücke durch, des Weiteren kann man die Abschnittsfugen meist auch am Intrados des Bogens erkennen. Die Abschnittsfugen rühren von der Bauweise des Wölbens in Abschnitten:⁸¹⁴ Beutel äußerte sich hierzu in seiner Publikation. Das Wölben in Ringen lehnte er bei Stampfbetonbrücken ab, da die einzelnen Ringe kaum die gewünschte feste Verbindung erhalten können und weil insbesondere die ständige und elastische Einbiegung des Lehrgerüsts die unteren Ringe leicht springen und reißen und in ihrer Festigkeit große Einbußen erleiden lasse. Deshalb werde jede Gewölbehälfte im Falle der Kemptener Illerbrücken in fünf Teile zerlegt, *„die nacheinander, jedoch derart zur Ausführung gelangen, dass die korrespondierenden rechts- und linksseitigen Abteilungen je gleichzeitig und in ihrer ganzen Stärke hergestellt werden, um die ungünstigen Folgen der Lehrgerüstsenkungen zu paralysieren.“* [Beutel 1903; 1904, S. 3].⁸¹⁵ Die Abbildung 8.48 zeigt eine Hälfte des von der Verfasserin erstellten Aufmaßes der Lautracher Brücke und deren Abschnittsfugen: Man kann erkennen, dass hier sieben Abschnitte ausgeführt wurden. Die relativ hohe Anzahl an Abschnitten ermöglichte, wie bereits in Kap. 6.3.4 erläutert, eine genauere Kontrolle der Lehrgerüstverdrückungen. In der Aufmaßzeichnung ist die Reihenfolge der Betonierabschnitte nummeriert. Dies ist am Bauwerk nicht ablesbar und wurde gemäß [Séjourné 1913d, S. 163] ergänzt. Von den in Kap. 6.3.4 besprochenen Phänomenen bestätigen sich dabei die folgenden: Der erste Abschnitt wurde im Scheitel verlegt, um dessen Hebung zu minimieren. Die Reihenfolge der nachfolgenden Abschnitte zielt darauf, möglichst lange für sich bewegliche Teile zu erhalten sowie den Verdrückungen aus den jeweils vorangehenden Abschnitten entgegenzuwirken.

Die Größe dieser Abschnitte wurde auch hier derart gewählt, dass sie jeweils innerhalb eines Arbeitstages fertiggestellt werden konnten – da auf beiden Bogenschenkeln gleichzeitig gearbeitet wurde, konnte ein solch bedeutender Bogen in nur sieben Werktagen betoniert werden.⁸¹⁶ Die Fugen wurden radial ausgebildet, damit sie senkrecht

⁸¹⁴ Vgl. Kap. 6.3.4.

⁸¹⁵ Gemäß Abbildung 6.24 sind entgegen der Planung jedoch acht Teile je Hälfte ausgeführt worden.

⁸¹⁶ Die Betonage erfolgte nach [L. (Liebold) 1904, S. 453–454] vom 25. September bis 03. Oktober 1903, also innerhalb von insgesamt neun Tagen. Der 25. September war ein Freitag, der 03. Oktober ein Samstag. Wenn man den Sonntag als Arbeitstag abzieht, ergibt sich eine tatsächliche Ausführungszeit von acht Werktagen.

zum Kraftfluss standen. Dadurch wurde die Fuge überdrückt, Scherkräfte wurden so vermieden.

Eine ausführliche Betrachtung verdienen noch die Gelenke der Illerbrücke (Abbildung 8.49): Wie weiter oben in den Beschreibungen zur Planung bereits erwähnt, sah Beutel die Gelenke in erster Linie für die Handhabung der erwarteten Bewegungen aus der Temperatur vor. Die Wälzgelenke wurden auf Kunststeinen verlegt, zur gleichmäßigen Druckverteilung dienten dünne Bleiplatten zwischen Gelenk und Beton [Beutel 1903; 1904, S. 412]. Diese Bleiplatten sind bis heute am Bauwerk erkennbar (Abbildung 8.50). Um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, wurde rückseitig eine Revisionsmöglichkeit in die Pfeiler eingebaut. Des Weiteren wurden die Gelenke bündig mit Beton verfüllt und dann mit Asphalt vergossen [Beutel 1903; 1904, S. 411–412]. Die Gelenköffnungen waren mit Fertigteilen verschlossen. Diese Fertigteile sind heute bis auf eine Stelle am Scheitelgelenk nicht mehr am Bauwerk vorhanden, so dass man die Betonfüllung gut sehen kann (Abbildung 8.51). Der Asphaltverguss konnte am Bauwerk nicht mehr festgestellt werden. Dafür sind in der Gelenkfuge Reste einer Zwischenlage, vermutlich einer Asphaltpappe, zu erkennen, die die Beweglichkeit der Gelenkfuge aufrechterhielt.⁸¹⁷ Das Gelenk sowie die Dilatationsfuge sind in Abbildung 8.51 dargestellt: Diese Fugen verlaufen vom Gelenk nach oben durch das komplette Bauwerk hindurch (s. auch Abbildung 8.48). Bei genauer Betrachtung kann man innerhalb der Dilatationsfuge das Licht von der Rückseite durchscheinen sehen.

Die Lautracher Gelenke weisen eine Besonderheit auf: Im Kap. 7.5.6 wurde das Phänomen des Gleitens insbesondere am Beispiel des Bauunfalls der Maximiliansbrücke in München ausführlich betrachtet. Eine solche Verschiebung ist auch an den Gelenken der Illerbrücke zu erkennen. Nach Kenntnis der Verfasserin ist die Illerbrücke in Lautrach damit die einzige Brücke innerhalb dieses Forschungsgebiets, die eine sichtbare Verschiebung im Gelenk aufweist.

Bei der Illerbrücke in Lautrach wurde das Phänomen des Gleitens während des Ausrüstens beobachtet: Die Gelenke verschoben sich um ca. 17 mm gegeneinander [L. (Liebold) 1904, S. 454]. Der Grund hierfür ist nicht ganz klar: Die Gelenke wurden nach Beutel zwar mit einem „*rostschützenden Anstrich*“ [Beutel 1903; 1904, S. 411] versehen, ob dieser jedoch wie im Fall der Münchner Brücke ebenfalls aus einem Schmiermittel bestand, ist nicht bekannt. Die Krümmungsradien der Wälzflächen sind in Lautrach auch recht flach, wenngleich etwas geringer als bei der Münchner Brücke.⁸¹⁸ Ob dies jedoch der ausschlaggebende Faktor war, konnte nicht festgestellt werden. Die Spuren des Gleitens kann man bis heute sehen (Abbildung 8.53): Zum einen ist die Verschiebung am Kämpfergelenk messbar, zum anderen sieht man auch die bauzeitlich aufgetragenen „Kontrollmarken“, die zur weiteren Überwachung des Gleitens eingebracht worden waren.

⁸¹⁷ Zum Bau der Reichsstraßenbrücke über die Save in Krainburg ist eine ähnliche Gelenkausbildung publiziert worden [Hermann 1911, Tafel 39; Abbildung 8.52]. Es handelt sich dort zwar um ein Zapfengelenk, die Füllung mit Zementmörtel sowie einer 10 mm dicken Asphaltpappe ist jedoch vergleichbar.

⁸¹⁸ Lautrach: 0,35 und 2,0 m [L. (Liebold) 1904, S. 442], zum Vergleich Maximiliansbrücke: 0,30 und 3,0 m [Dietz 1904, S. 1408]. Spätere Ausführungen: Isarbrücke Grünwald: 0,20 und 0,25 m [Mörsch 1904, S. 265], Laufenmühlviadukt der Wieslaufalbahn: 0,16 und 0,20 m [Jori, Schaechterle 1911b, S. 33; Abbildung 7.64a] und viele weitere.

Wie man sieht, weisen die Kontrollmarken bis heute keine zusätzliche Verschiebung mehr auf, das Gleiten kam selbsttätig zum Stillstand.

Insofern sah man diesen Umstand bei der Lautracher Brücke nicht als bedenklich an. Die Brücke wurde in dem Zustand mit den verschobenen Gelenken im April 1904 einer Probelastung unterworfen, die erfolgreich verlief [L. (Liebold) 1904, S. 454]. In der Folge wurden die Bahnlinie Memmingen–Legau und somit auch die Illerbrücke in Lautrach am 20. Juni des Jahres 1904 feierlich eröffnet, der reguläre Betrieb begann nur wenige Tage später. Die Aussagen in der Lokalpresse waren geradezu überschwänglich: *„Die Illerbrücke ist nicht nur ein Meisterwerk der Bautechnik (...), [sie, Erg. d. Verf.] ist auch der Glanzpunkt der Legauerbahn. Selten wird man so hochromantische Flußübergänge herausen in der Ebene und bei Lokalbahnen finden!“* [N. N. 1904e, S. 1].

Nur eine Woche nach der feierlichen Eröffnung der Bahnlinie Memmingen–Legau über die Lautracher Illerbrücke kam es zu der mehrfach erwähnten Katastrophe beim Bau der Maximiliansbrücke in München. In den Tagen nach dem spektakulären Unfall waren die Tageszeitungen voll von diesbezüglichen Nachrichten. Begünstigt durch die Presse wurden auch in Lautrach Stimmen laut, die um die Standsicherheit der Illerbrücke fürchteten: Vier Tage nach dem Unfall wurde in der Memminger Zeitung unter der Überschrift *„Die Münchener Maximiliansbrücke und die Lautracherbrücke“* [N. N. 1904f, S. 2] ein Vergleich beider Brücken gezogen. In diesem Zusammenhang berichtete der Zeitungsartikel, dass die Lautracher Brücke Risse aufweise. Zwar sei dies kein Grund zu weitergehender Beunruhigung, da die Brücke erst kurz zuvor amtlich auf ihre Betriebssicherheit geprüft worden sei, jedoch wolle man die verantwortlichen Behörden aufmerksam machen [N. N. 1904f, S. 2]. Dem Vertrauen in der Bevölkerung war das dennoch abträglich und so schrieb ein gewisser Baumeister Anton Naegle in einem Leserbrief,⁸¹⁹ einige beunruhigte Gemüter glauben in absehbarer Zeit auch in Lautrach einer ähnlichen Katastrophe entgegenzusehen. Dieser Vergleich sei jedoch nicht statthaft, da die Rahmenbedingungen insbesondere hinsichtlich des anstehenden Untergrundes andere seien. Keiner der Bogen der Lautracher Brücke zeige auch nur die Spur eines Risses und es sei alles in tadellosestem Zustand [Baum 1969, S. 62].

Letztlich waren insbesondere der Einsturz der Maximiliansbrücke in München, aber auch die Negativerfahrungen wie sie beim Bau der Illerbrücke gemacht worden waren, Auslöser dafür, dass ab 1904 Wälzgelenke nicht mehr ohne zusätzliche Sicherungen gegen Gleiten ausgeführt wurden.⁸²⁰ Die üblichen Maßnahmen wurden im Kap. 7.5.6 bereits umfassend besprochen.

Die Lautracher Brücke stellt in ihrem heutigen Zustand ein herausragendes Zeugnis des Stampfbetonbrückenbaus um die Jahrhundertwende dar. Selbst den Vergleich mit den wesentlich bekannteren Illerbrücken in Kempten (1903–1906) muss die Lautracher Brücke nicht scheuen: Während die Kemptener Brücken zwar eine größere Lichtweite

⁸¹⁹ Der Leserbrief ist abgedruckt in [Baum 1969, S. 62]. Das Original konnte bei der Recherche in Memminger und Allgäuer Zeitung sowie im Memminger Volksblatt nicht aufgefunden werden.

⁸²⁰ Vgl. *„Aber auch dieser Fall lehrt, daß man mit den Wälzungsgelenken in Stahl sehr vorsichtig sein muß, daß es sich jedenfalls empfiehlt, ihnen entweder schon in der Form oder durch besondere Sicherungseinrichtungen einen festen Halt gegen Abrutschen zu geben.“* [Büsing 1912, S. 617].

aufweisen, ist die Lautracher Brücke in der für Dreigelenkbogen viel wesentlicheren Abmessung der Stützweite⁸²¹ etwa 7 m größer. Auch bauzeitlich wurde das Bauwerk viel beachtet:⁸²² Friedrich Wilhelm Büsing bezeichnete es in der vierten Auflage seines Buches zum Portlandzement als „auch heute noch (...) weitest gespannte Beton-Brücke“ [Büsing 1912, S. 616]. Zudem ist die Brücke in ihrem unverfälschten Zustand bis heute ein hervorragendes Forschungsobjekt: Schalbrettandrücke, Stampf- und Abschnittsfugen sowie die Gelenke mit ihren erkennbaren Verschiebungen sind sichtbar und liefern wertvolle Erkenntnisse für das Verständnis dieser Bauweise. Alle am Bauwerk ablesbaren Spuren bilden einen wesentlichen Teil des Denkmalwertes dieser Betonbrücke. Alles zusammen – technische Eigenschaften, außergewöhnlich umfangreiche Dokumentation sowie unverfälschter Zustand des Bauwerkes – machen die Einzigartigkeit dieser Brücke aus.

Seit die Lautracher Brücke außer Betrieb genommen wurde, wurden nur noch sporadisch Unterhaltsmaßnahmen durchgeführt. Obwohl sich nach Ansicht der Verfasserin die Brücke augenscheinlich in einem erfreulich guten Zustand befindet, ergab ein durch den Landkreis in Auftrag gegebenes Gutachten die Notwendigkeit einer „Vollsanierung“: Nach Meinung des zuständigen Ingenieurs „lässt die Festigkeit des Betons nach, Kanten lösen sich ab und es sind Risse vorhanden.“ [Landratsamt Unterallgäu 2013]. Des Weiteren sei ein „Betondeckel“ notwendig, um das Eindringen von Wasser zu verhindern, das den Beton mürbe machen könne [Steuer 2011]. Zur Untersuchung der Risse wurden im Sommer 2011 diverse Gipsmarken am Bauwerk angebracht; eine durch die Verfasserin im Sommer 2012 durchgeführte Sichtung dieser Marken zeigte keinerlei Beschädigung, waren diese doch nahezu ausschließlich auf Stampffugen und auf Schwindrisse aufgebracht worden (Abbildung 8.55). Abplatzungen an Kanten und Konsolen sind zwar vorhanden (Abbildung 8.54), diese sind jedoch für die Standsicherheit nicht relevant – lediglich die Sicherheit sich eventuell unter der Brücke aufhaltender Personen bzw. die Bestandserhaltung könnte hier ein Eingreifen begründen. Einsicht in die Untersuchungsergebnisse zur Betonfestigkeit wurde nicht gewährt, dennoch lässt sich vermuten, dass die „nachlassende Festigkeit“ auf die Tatsache zurückzuführen ist, dass in einer solchen Bogenbrücke je nach den Anforderungen immer Betone verschiedener Rezepturen und Festigkeiten verwendet wurden und die Beprobungsergebnisse, die unweigerlich verschiedene Festigkeiten aufweisen müssen, deshalb missverstanden wurden. An der Beurteilung des Gesamtzustandes sind Zweifel wohl begründet, trotzdem werden Sanierungsmaßnahmen wohl nicht mehr aufzuhalten sein.

⁸²¹ Lichtweite: Kempten 64,5 m, Lautrach 59 m; Stützweite: Kempten etwa 50 m, Lautrach etwa 57,1 m.

⁸²² Neben der in diesem Abschnitt verwendeten Literatur beispielsweise [Strukel 1913, S. 142; S. 212] und auch international wurde es wahrgenommen und publiziert; vgl. [A. C. 1907] sowie [Séjourné 1913d, S. 156–164].

9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die im Verlauf des 19. Jahrhunderts über Deutschland hereinbrechende Industrialisierung führte zu einem einschneidenden Wandel der Wirtschafts- und Sozialstrukturen.⁸²³ Massenfertigung, Zentralisierung der Produktion in großen Fabrikanlagen, Automatisierung usw. erforderten einen hohen Einsatz an Arbeitskraft, Rohstoffen, Energie und vielem mehr. Das Transportwesen gewann an Wichtigkeit, sowohl Rohstoffe als auch Waren mussten zu Produktionsstätten bzw. von dort zu den Kunden gebracht werden. Arbeiter zogen vom Land in die Nähe der Fabriken, auch hier erhöhte sich der Mobilitätsbedarf.

Mit der Einführung der Eisenbahn und dem Bau eines weitverzweigten Streckennetzes explodierte der Bedarf an Brückenbauten. Im Verlauf des 19. Jahrhunderts führten die verbesserten Herstellungstechniken sowie die erwachende Ingenieurwissenschaft zu einer Blütezeit des Eisenbrückenbaus, wohingegen Mauerwerkskonstruktionen einen starken Rückgang erlebten.⁸²⁴

Der Brückenbau zum Ende des 19. Jahrhunderts hingegen ist geprägt von einem erstaunlichen Aufschwung der massiven Brücken und einem Rückgang des Baus eiserner Konstruktionen. Die Gründe für diesen Wandel sind vielschichtig und nur deren Zusammenspiel konnte einen derartigen Umbruch herbeiführen. Technische Probleme hinsichtlich Korrosion des Werkstoffes Eisen sowie dessen mangelhafte Dauerfestigkeit bezüglich dynamischer Lasten führten zu einer Ernüchterung im Eisenbrückenbau.⁸²⁵ Ebenso lösten die durch die Industrialisierung hervorgerufenen drastischen Veränderungen ein Unbehagen bei den Menschen aus, Heimatschutzbewegungen formierten sich.⁸²⁶ Damit einhergehend änderte sich auch das ästhetische Empfinden der Menschen: Die gewölbte Brücke als über Jahrhunderte bewährter Bautyp wurde wieder als gefällig empfunden.⁸²⁷

In diese Zeit hinein fällt die Renaissance des Massivbrückenbaus. Die wichtigsten Triebfedern für den Aufschwung sind zum einen in der Kostensenkung,⁸²⁸ zum anderen in

⁸²³ Vgl. Kap. 2.1.

⁸²⁴ Vgl. Kap. 2.1. sowie z. B. „Der in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts mächtig zum Aufschwung kommende Eisenbrückenbau drängte überhaupt den Bau der Steinbrücken eine Zeitlang ziemlich in den Hintergrund.“ [Melan 1911, S. 3].

⁸²⁵ Vgl. Kap. 2.1.

⁸²⁶ Vgl. Kap. 2.1.

⁸²⁷ Vgl. z. B. „Als eine Sache von einschneidender Bedeutung ist noch die Ueberlegenheit des Steinbaues in künstlerischer Beziehung gegenüber dem Eisen zu nennen. Engstes Einschmiegen in Landschaft und Städtebild, wuchtige und doch elegante, lediglich durch die Schönheit der Form ohne unnötige Aufbauten wirkende Erscheinung sichern ihm diesen Vorrang.“ [Leibbrand 1906b, S. 279].

⁸²⁸ Vgl. z. B.: „Dass der Bau von steinernen Brücken durch den Bau der eisernen Brücken zeitweise in einer fast unerklärlichen Weise verdrängt wurde, mag, abgesehen von dem Reiz der Neuheit, seinen Grund hauptsächlich darin gehabt haben, dass sich bei gewölbten Brücken der Bau aus lauter Quadern fast als ganz selbstverständlich eingebürgert hatte und daher aussergewöhnlich hohe Kosten verursachte. Es musste fast den Anschein gewinnen, als seien die vielfachen lehrreichen Beispiele gut erhaltener alter Bruchsteinbrücken ganz verloren gegangen, jedenfalls wurden sie von vielen insofern unbeachtet gelassen, als die durch bessere

den technischen Fortschritten der Massivbauweise zu sehen. Die Reduzierung der Kosten ist wiederum auf mehrere Entwicklungen zurückzuführen. Insbesondere wurde durch die Verbesserung der Bindemittel bis hin zum Portlandzement der Bau mit kleinen, weitgehend unbearbeiteten Materialien möglich.⁸²⁹ Die Baukosten⁸³⁰ im Vergleich zum Werksteinbau verringerten sich dadurch drastisch.⁸³¹ Der Massivbrückenbau wurde demzufolge in Bezug auf die Kosten konkurrenzfähig mit eisernen Konstruktionen, insbesondere im Hinblick auf den geringeren Aufwand beim Unterhalt sowie auf die höhere Lebenserwartung⁸³² der Brücken. Ein starkes Streben nach Rationalisierung der Bauweise, wie etwa durch Mehrfachverwendung der Lehrgerüste,⁸³³ unterstützten die Kostensenkung hauptsächlich ab der Zeit um die Jahrhundertwende.

Auf der anderen Seite stieg der Kenntnisstand in der Planung und Ausführung: Sowohl die ausgedehnten Versuche an Probebauten⁸³⁴ als auch die Untersuchungen der Materialprüfanstalten bis hin zu den beim Bau realer Brückenbauwerke erlangten Erfahrungswerten präzisierten das Wissen der Ingenieure. Die Steigerung der Zement- und damit der Betonqualität, die kontrollierte Anpassung des Mischungsverhältnisses der Betonkomponenten, die Optimierung der Bauabläufe und letztlich auch der gezielte Einsatz von Maschinen bildeten die Eckpunkte für den technischen Fortschritt. Damit konnten bautechnische Probleme wie etwa die Gefahr der Rissbildung kontrolliert werden.⁸³⁵ Darüber hinaus ermöglichte der hohe Kenntnisstand in der Bemessung der Bauwerke eine bessere Ausnutzung des Materials, was die Minimierung der Bogenstärken ermöglichte und somit eine weitere Einsparung beim Material nach sich zog.

Mit der Einführung von Gelenken erlangte die Bauweise eine andere Ebene: Die Bogen wurden damit statisch bestimmt und genau berechenbar. Unsicherheiten bezüglich der

Mörtel erweiterte Anwendbarkeit dieser Bauweise nicht in gehörigem Masse ausgenutzt wurde. Der grosse Aufschwung des Cementgewerbes und das Bestreben, für die Massenerzeugung von Cement vermehrte Absatzgelegenheit zu schaffen, mag mit Veranlassung dazu gegeben haben, durch Versuche seitens der Cementfabriken auf einen billigen Massivbau hinzuweisen. In erster Linie handelt es sich hierbei um Concret- oder Betonbauten, bei denen ein ganz erheblicher Cementverbrauch bedingt war. Es lag auf der Hand, dass bei der massenhaften und billigen Herstellung des Cements ein überall verwendbarer Mörtel geschaffen war, an den man bezüglich der Festigkeit und der Abkürzung der Bindezeit ganz andere Ansprüche stellen konnte, als an den früher in den meisten Fällen zur Verfügung stehenden Mörtel. Es lag daher nahe, diesen veränderten Verhältnissen gemäss auch gewisse Ausführungsarten sachgemäss zur Verbilligung und Verbesserung von Bauausführungen umzugestalten.“ [Stiehl 1895, S. 228].

⁸²⁹ Vgl. Kap. 2.2 sowie Kap. 3.2.

⁸³⁰ Zu den Kosten vgl. eine ausführliche Aufstellung von Melan aus dem Jahr 1911, in der er zahlreiche Massivbrücken insbesondere im Hinblick auf Baumaterial, Spannweiten und Kosten aufführt [Melan 1911, S. 4–12].

⁸³¹ Kaum Aufwand für die Bearbeitung des Steinmaterials, geringerer Aufwand für den Transport und das Versetzen des Steinmaterials, geringere Qualifikation der Arbeitskräfte notwendig, usw.

⁸³² Vgl. beispielsweise die Aussage über den Entwurf zu einer gewölbten Rheinbrücke in Worms „welche (...) Jahrhunderte, ja selbst Jahrtausende hindurch allen Unbilden der Witterung und den Angriffen des Stromes Trotz zu bieten vermag und dabei auch unzweifelhaft in Bezug auf die äussere Erscheinung jedem Eisenbau vorzuziehen ist.“ [Krone, Ehardt 1898, S. 22].

⁸³³ Vgl. Kap. 5.1.4.

⁸³⁴ Vgl. Kap. 4.4.

⁸³⁵ Vgl. Kap. 6.2 sowie Kap. 6.3.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Lage der Stützlinie im Bau- wie im Endzustand konnten ausgeräumt werden.⁸³⁶ Auf diese Weise konnte der Sicherheitsfaktor niedriger gewählt werden – auch dies führte zu einer Optimierung der Gewölbestärke [Leibbrand 1906b, S. 250].

Der Fortschritt einer Bauweise ist immer eng verbunden mit den Akteuren. In Bezug auf Stampfbeton seien hier auf Unternehmensseite z. B. Bernhard Liebold, Dyckerhoff & Widmann oder Feege & Gotthard genannt, auf Ingenieursseite im staatlichen Dienst insbesondere E. H. Hoffmann, Ferdinand Beutel sowie die beiden Leibbrands – um in beiden Sparten nur einige ganz wenige herauszugreifen.

Einige der wichtigsten Unternehmen entwickelten sich aus originären Portlandzementfabriken.⁸³⁷ Um den wirtschaftlichen Erfolg ihrer Fabriken zu sichern, gründeten beispielsweise Bernhard Liebold wie auch Dyckerhoff & Widmann⁸³⁸ den Fabriken angeschlossene, wirtschaftlich jedoch eigenständige Baugeschäfte. Diese dienten in erster Linie dazu, die Betonbauweise zu verbreiten, die Eignung des Baustoffes zu beweisen sowie die praktischen Kenntnisse im Umgang mit dem neuen Material zu erhöhen, um in der Folge den Absatz des Zementes und damit den finanziellen Ertrag der Fabrik zu steigern. Dabei kann festgestellt werden, dass die Bauunternehmer bzw. Fabrikanten ihr Wissen bereitwillig weitergaben: In den ersten Jahren nach der Gründung kann bei Bernhard Liebold eine starke Publikationstätigkeit festgestellt werden. Neben der Wissensvermittlung dienten diese Veröffentlichungen insbesondere auch der Werbung für den eigenen Betrieb. Ein weiterer sehr bedeutender Weg, den die Unternehmer beschritten, war die Erschließung neuer Märkte durch die Erweiterung der Anwendungsbereiche des Zementes, im Falle Bernhard Liebolds war dies der Brückenbau.

Auf Seiten der Ingenieure ging das Interesse mehr in die Richtung, den technischen sowie architektonischen Anforderungen zwar in allen Richtungen entsprechende, dabei jedoch kostengünstige Bauwerke zu erstellen. In der Zusammenarbeit beider Gruppen – Unternehmern und Bauräten – perfektionierte sich die Fachkenntnis zum Betonbrückenbau.⁸³⁹ Ebenfalls erkennbar ist ein ungeheurer Innovationsdurst, der innerhalb kürzester Zeit zu einem nahezu explosionsartigen Fortschritt der Bauweise führte.

In Deutschland kann man diesen an einigen wenigen Bauwerken aufzeigen: Im Jahr 1877 erbaut Bernhard Liebold sein Lennebrücklein in Vorwohle mit einer Lichtweite von 7 m.⁸⁴⁰ Diese wird zu dieser Zeit noch vielfach wahrgenommen und – teilweise auch kontrovers – diskutiert. Bereits acht Jahre später, im Jahr 1885, wird mit dem Murgaquädukt in

⁸³⁶ Vgl. Kap. 7.

⁸³⁷ Vgl. die Entwicklung der Firma Liebold in Kap. 4.5 sowie die Entwicklung der Firma Dyckerhoff & Widmann in [Stegmann 2014].

⁸³⁸ Damals noch unter anderer Firmierung [vgl. Stegmann 2014].

⁸³⁹ Vgl. z. B. die Aussage Max Leibbrands: „Nicht zum wenigsten sind die Fortschritte, die wir in den letzten Jahrzehnten zu verzeichnen haben, dem Zusammenwirken der entwerfenden Ingenieure mit leistungsfähigen Tiefbau-Unternehmungen zu verdanken, ja die letzteren haben vielfach befruchtend auf die Entwicklungen der Brückenbaukunst eingewirkt.“ [Leibbrand 1906a, S. 640].

⁸⁴⁰ Vgl. Kap. 4.5.

Langenbrand⁸⁴¹ mit einer Lichtweite von 40 m das erste weitgespannte⁸⁴² Brückenbauwerk aus Beton in Deutschland gebaut, das mit einem Pfeilverhältnis von 1/8 zudem bereits über einen erstaunlich flachen Bogen verfügt [Séjourné 1913c, S. 216–220]. 1893 folgt die mit temporären Stahlgelenken ausgestattete, 50 m weite Donaubrücke in Munderkingen (Pfeilverhältnis 1/10) und nur wenig später die mit permanenten Gelenken erbaute Donaubrücke in Inzigkofen (1895, 43 m, 1/10). Mit den parallel stattfindenden Materialuntersuchungen sowie der damit einhergehenden Verbesserung der Eigenschaften des Betons liegen zu dieser Zeit die Werkzeuge vor, um Bogen zu bauen, denen hinsichtlich Weite und Kühnheit kaum noch Grenzen gesetzt scheinen. Und so formulierte Baurat August Rheinhard bereits im Jahr 1887, dass die Zeit nicht mehr fern sein könne, in der man Brücken mit Spannweiten bis zu 100 m aus unvergänglichem Stein erbaue [Rheinhard 1887, S. 350].⁸⁴³

⁸⁴¹ Der Murgaquädukt (Beschreibung im Katalog unter Ba-Wü13) war seinerzeit ein absolut herausragendes Bauwerk, jedoch blieb er bauzeitlich nahezu unbeachtet. Intensive Recherchen sowohl in Archiven, wie etwa den Landesarchiven Baden-Württembergs, als auch in der historischen Fachliteratur sowie in den einschlägigen Bauzeitschriften erbrachten über wenige kurze Erwähnungen keine ausführlichen Beschreibungen des Bauprojektes (z. B. [Büsing 1892, S. 277]; [Leibbrand 1906c, S. 456]; am ausführlichsten noch in [Séjourné 1913d, S. 216–220]). Der Bauherr, die Papierfabrik Holtzmann, ging später in einem finnischen Konzern auf. Das Werksgelände der Fabrik ist heute stillgelegt. Unterlagen konnten hier nicht mehr auffindig gemacht werden. Verantwortlich für den Entwurf war der Freiburger Stadtbaumeister Karl von Müller (1844–1910). Im Stadtarchiv Freiburg konnte dessen Personalakte aufgefunden werden. Hieraus ist zu entnehmen, dass Müller von 1881 bis 1888 in Freiburg tätig war. Unterlagen zum Brückenbau waren jedoch nicht vorhanden [StadtAFR, Sign. StadtAF, C3/120/13]. Eine Anfrage im Baurechtsamt und Kreisarchiv Rastatt ergab lediglich das Vorhandensein von Lageplänen. In einem Plan von 1887 ist der mit „Betonbrücke“ bezeichnete Aquädukt zu erkennen. Allerdings ist die Darstellung recht schematisch [Kreisarchiv Rastatt, Sign. 1/LRA Nr. 43]. Die ausführende Firma war Thormann & Schneller aus Augsburg. Intensive Recherchen zu dieser Firma wurden durch die Rahmenbedingungen behindert: Die Firma ging in der späteren Walter Bau AG auf, die vor etwa zehn Jahren in die Insolvenz ging. Firmenunterlagen – auch aus der Frühzeit des Unternehmens – konnten im Stadtarchiv Augsburg aufgespürt werden. Aufgrund eines Insektenbefalls sowie der Standortverlegung des kompletten Archivs sind diese Unterlagen jedoch über mehrere Jahre nicht zugänglich. Eine Anfrage beim Leiter des Stadtarchivs ergab, dass die Akten frühestens ab Mitte 2016 wieder zugänglich sein werden. Die Verfasserin wird diese Unterlagen im Nachgang zu vorliegender Arbeit sichten und gegebenenfalls nochmals gesondert auswerten und publizieren. Zur Firma Thormann & Schneller konnte recherchiert werden, dass diese bereits 1882 umfangreiche Betonbauten wie etwa das heute noch vorhandene Turbinenhaus für die Cröllwitzer Papierfabrik ausführte ([Weissenborn 1914, S. 158]; [Weissenborn 1921]). Weitere Ausführungen in Beton folgten für die München-Dachauer Papierfabrik im Jahr 1885 [Büsing 1892, S. 211; S. 246–247], so dass man davon ausgehen kann, dass Thormann & Schneller sich einen Namen im Bereich von Industrie-Betonbauten und insbesondere für Papierfabriken machen konnte. Die Bauten für die Papierfabrik Holtzmann in Langenbrand sind daher wohl als Fortführung einer kontinuierlichen Entwicklung zu sehen. Eine endgültige Bewertung kann allerdings erst nach Sichtung der Archivunterlagen erfolgen.

⁸⁴² Wenn man sich mit dem Begriff „weitgespannt“ an die Definition Séjournés anlehnt, der in seinem Werk „Grandes Voûtes“ Gewölbe mit über 40 m Lichtweite aufführt.

⁸⁴³ Bereits im Jahr 1881 hatte Theodor Landsberg vom Wettbewerb für eine Rheinbrücke bei Mainz berichtet. Hier habe es zwei Entwürfe für gewölbte Brücken gegeben. Die Spannweiten haben 93 bzw. 90 m betragen. Die erste sei aus Ziegel von E. H. Hoffmann vorgeschlagen, die zweite mit Stahlgelenken in den Kämpfern [Landsberg 1881, S. 47]. Beide Entwürfe – sowohl hinsichtlich der Weite als auch des Einsatzes von Stahlgelenken – sind um diese Zeit als Revolution zu bezeichnen. Und so ist auch festzustellen, dass beide Entwürfe ihrer Zeit wohl noch voraus waren. Das Urteil lautete, dass im Vergleich zu den bis dahin ausgeführten gewölbten Brücken die Kühnheit dieser Entwürfe in den geplanten Dimensionen so bedeutend sei, dass deren Ausführung zu jener Zeit noch „mit Recht für bedenklich gehalten wird, zumal man in dem Eisen ein für bedeutende Spannweiten und geringe Pfeilhöhen äusserst geeignetes Material besitzt.“ [Landsberg 1881, S. 47]. Die Entwürfe werden deshalb nicht einmal genauer beschrieben. Eine etwas genauere Beschreibung findet sich in [Gaedertz 1881, S. 133]. Der Entwurf von Hoffmann sei fünf bogig mit maximal 93 m Lichtweite und 10,9 m Pfeilhöhe sowie einer Scheitelstärke von 1,1 m geplant. Die andere verfüge über ebenfalls fünf Bogen, jeweils mit 90 m Stützweite und 9 m Pfeilhöhe. Das sich ergebende Pfeilverhältnis von

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Jahr 1897 findet ein Wettbewerb für eine neue Rheinbrücke bei Worms statt: Die Spannweiten der dreibogigen Brücke betragen 100 m in der Haupt- sowie jeweils 96 m in den Nebenöffnungen [Krone, Ebhardt 1898, S. 19]. Die Dreigelenkbogen wurden mit Klinker-Mauerwerk und Zementmörtel geplant [Krone, Ebhardt 1898, S. 20], das Pfeilverhältnis betrug 1/9 in der Hauptöffnung [Leibbrand 1906b, S. 280]. 1903 folgt der Wettbewerb zur Neckarbrücke in Mannheim: Hier verfügt der Hauptbogen in Klinker-Mauerwerk mit Zementmörtel über 113 m Lichtweite, 112 m Stützweite bei einem Pfeilverhältnis von 1/12,3 [Landsberg 1901, S. 335].⁸⁴⁴ Die Stimmen zu diesem Entwurf zeugen von Begeisterung, wie etwa das Zitat von Theodor Landsberg zeigt: *„Mit einer geradezu verblüffenden Kühnheit wird von ausgezeichneten und in langer Praxis erfahrenen Ingenieuren ein Bauwerk vorgeschlagen, welches alles Herkömmliche um ein Bedeutendes übertrifft. (...) Vielleicht wird man in späterer Zeit von diesem Wettbewerb an die Zeit der ‚gewölbten Riesenbrücken‘ rechnen.“* [Landsberg 1901, S. 335].

Beide genannten Brücken – die Rheinbrücke bei Worms sowie die Neckarbrücke bei Mannheim – wurden nicht gebaut.⁸⁴⁵ Sie wurden jedoch vom Fachpublikum wahrgenommen und diskutiert. Und so bemerkte Max Leibbrand in seinem Artikel, dass unter den Entwürfen derjenige für die Neckarbrücke Mannheim die größte Beachtung verdiene: *„Er vereinigt sozusagen sämtliche Fortschritte der Neuzeit auf diesem Gebiet, und seine Nichtausführung ist zu bedauern.“* [Leibbrand 1906b, S. 279]. Beide Bauwerke sind nicht aus Beton, dennoch gaben sie Impulse für den Fortschritt in der Formgebung gewölbter Brücken hinsichtlich Weite und Kühnheit. So hielten die bauzeitlichen Ingenieure die Entwürfe für ausführbar, sie seien nur deshalb nicht gewählt worden, weil in den Preisgerichten ein starker Überhang an Eisenexperten wahrzunehmen sei [Leibbrand 1906a, S. 640].⁸⁴⁶ Im Jahr 1902 verfasst der Mannheimer Regierungsbaumeister Probst einen Artikel, in dem er vertritt, dass bei weiteren Verbesserungen, hier insbesondere Gewichtseinsparungen im Überbau, bei verfügbarer Bauhöhe selbst die größten Spannweiten in Stein überbrückt werden können: In einer Auflistung berechnet er Brücken mit einer Lichtweite bis 690 (!) Meter [Probst 1902, S. 8].

Die Ausführung von Betonbrücken indes setzte sich beispielsweise mit der Friedensbrücke in Plauen (1903–1904, 90 m, 1/10) und dem unbewehrten⁸⁴⁷ Zwillingsbogen der Lotbrücke in Villeneuve-sur-Lot (1914–1919, 98 m, 1/6,4) fort.

1/10 ist bemerkenswert. Während der Bauzeit seien Kugelgelenke an den Kämpfern geplant – hier werden also temporäre Gelenke beschrieben. Auch das Urteil von Gaedertz ist klar: *„Diese Projekte sind sehr kühn zu nennen, da Steinbögen bis jetzt nur bis zu ca. 67 m (Cabin John Br. Washington) vorhanden sind und über das Verhältnis des Materials bei Weiten von 90 m und der nöthigen flachen Sprengung von ca. 1/10 der Spannweite Erfahrungen absolut nicht gemacht sind.“* [Gaedertz 1881, S. 133].

⁸⁴⁴ Vgl. auch die ausführliche Beschreibung zu diesem Wettbewerb in [Eiselen 1901] sowie einer Leserzuschrift von Baurat Krone, der die Kühnheit des Bogens nochmals hervorhebt [Krone 1901].

⁸⁴⁵ Im Gegensatz zum Entwurf für die Mainzer Brücken aus dem Jahr 1881 (vgl. Fußnote 843) wurde inzwischen jedoch die Möglichkeit der Ausführung zugestanden, gebaut wurden sie trotzdem nicht [Probst 1901, S. 399].

⁸⁴⁶ Vgl. beispielsweise auch [Probst 1901, S. 399].

⁸⁴⁷ Vgl. hierzu die Aussage Freyssinets, die Bogen seien aus Beton ohne jegliche Bewehrung. Diejenige Bewehrung, die eingefügt worden sei, habe lediglich die Aufgabe, die Aufbauten zu verankern [Freyssinet 1921, S. 98].

Dennoch blieb die „magische“ 100-Meter-Marke unerreicht und so fragte Paul Séjourné im Jahr 1914: *„Warum haben wir bis heute keine Gewölbe über 100 m gebaut? Wir haben exzellenten Zement und wir wissen, wie man ein Gewölbe baut. Wir dürfen kühne Konstruktionen verwenden und wir gehen hierbei kein großes Risiko ein: ein gut gegründetes Gewölbe, sorgfältig gebaut, mit gutem Material kann nicht einstürzen.“*⁸⁴⁸ [Séjourné 1914, S. 207].⁸⁴⁹

Als Hauptgrund hierfür ist sicherlich die Ablösung des Stampfbetons durch den Stahl-, später auch durch den Spannbeton zu sehen, die den Brückenbau im 20. Jahrhundert beherrschen werden. Mit diesen Materialien werden völlig neue Formen von Massivbrücken möglich, Bauteildicken können weiter reduziert werden.⁸⁵⁰ Man verspricht sich, die Vorteile beider Bauweisen – die Druckfestigkeit des Betons und die Zugfestigkeit des Stahls – zu verbinden und mit der Umschließung des Stahls durch den Beton die Dauerhaftigkeit im Vergleich zum reinen Stahlbau zu erhöhen [Melan 1911, S. 84–86]. Der Stampfbeton spielt in der Folge in Ausführung, Normung und Fachliteratur eine mehr und mehr untergeordnete Rolle.

Denkmalpfleger und Ingenieure, die heute mit der Beurteilung von unbewehrten Betonbrücken betraut werden, stehen damit oft vor Problemen; Bewertungsgrundlagen gibt es nicht. Die Zustandsbewertung beinhaltet immer ein genaues Aufmaß sowie eine Schadenskartierung, gefolgt von Materialuntersuchungen. Hierbei sowie bei den geplanten Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen ist darauf zu achten, dass die Eingriffe möglichst lokal sind und den Charakter des Bauwerks nicht verfälschen.⁸⁵¹

Häufig stellt bereits die Einordnung der Brücke in den historischen Zusammenhang und damit die Feststellung des Denkmalwertes eine Schwierigkeit dar. Die Folge sind falsche Einträge in Denkmallisten⁸⁵² sowie das komplette Nichterkennen als Denkmal, da man mit der Bauweise nicht vertraut ist. So konnten im Rahmen vorliegender Arbeit einige hochrangige Denkmale aufgespürt und entsprechende Hinweise an die Behörden gegeben werden.⁸⁵³ Die vorliegende Arbeit soll ein Hilfsmittel für Denkmalpfleger, Ingenieure und Architekten sein, sich an eine bisher wenig bekannte Bauweise anzunähern – frei nach dem Ausspruch Johann Wolfgang von Goethes: „Man sieht nur, was man weiß“.⁸⁵⁴

⁸⁴⁸ Original: „Pourquoi n’a-t-on pas encore fait de voûtes de plus de 100 m? Aujourd’hui, on a d’excellent ciment, on sait faire une voûte: il est permis d’être hardi, et on n’y court pas grand risque: une voûte bien fondée, bien faite, en bons matériaux, ne peut tomber.“

⁸⁴⁹ Der Pont de la Caille mit seiner Lichtweite von 140 m stammt aus späterer Zeit, nämlich aus den Jahren 1925–1928 [Paris 1928].

⁸⁵⁰ Vgl. z. B. [Büsing 1905, S. 177].

⁸⁵¹ Vgl. Kap. 8.

⁸⁵² Im Rahmen dieser Arbeit konnten solche Einträge korrigiert werden.

⁸⁵³ Z. B. Lennebrücke in Vorwohle, Hammerkanalbrücke Esslingen, Alzbrücke Garching.

⁸⁵⁴ Im Original „Man erblickt nur, was man schon weiß und versteht.“ [Biedermann 1889–1896, Band 8, S. 352–359].

LITERATUR UND QUELLEN

Hinweise

Literaturnachweise wurden im Allgemeinen so übernommen wie auf den Deckblättern angegeben. Darüber hinaus wurde versucht, dort nicht angegebene Vornamen zu recherchieren und anzugeben (z. B. über Bibliotheksportale wie KVK usw.). Insbesondere bei den französischen Autoren, die als Ingenieure und Conducteurs an der École Nationale des Ponts et Chaussées tätig waren, wurden die Vornamen anhand [Felletin et al. 1993, 2008] ergänzt.

Zeitschriften

Folgende Bauzeitschriften wurden systematisch durchgearbeitet (Jahrgänge in Klammer):

Allgemeine Bauzeitung (1836–1918)

Annales des ponts et chaussées (1831–1907)

Baugewerks-Zeitung (1873–1898)

Beton und Eisen (1904–1910)

Centralblatt der Bauverwaltung (1881–1930)

Deutsche Bauzeitung (1867–1916)

F. L. Haarmann's Zeitschrift für Bauhandwerker (1858–1896)

Schweiz. Bauzeitung (1875–1918; 1875–1882 als „Die Eisenbahn–Le Chemin de Fer“)

Süddeutsche Bauzeitung (1891–1908)

Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover (1855–1910)

Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines (1865–1918)

Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure (1894–1903)

Zeitschrift für Bauwesen (1852–1930)

Zeitschrift für Baukunde (1863–1891)

Das „*Centralblatt der Bauverwaltung*“ wurde 1903 in „*Zentralblatt der Bauverwaltung*“ umbenannt. Der Einheitlichkeit halber hat sich die Verfasserin entschieden, unabhängig von der Jahreszahl diese Zeitschrift durchgehend mit „*Centralblatt der Bauverwaltung*“ zu bezeichnen.

ANHANG

Archivalien

Aufgesuchte Archive bzw. Behörden sowie verwendete Abkürzungen:

AEPMC	Archives d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris, Marne la Vallee
AMdG	Archives municipales de Gaillac
BAmtBB	Stadt Bad Berka, Bauamt
BWA	Bayerisches Wirtschaftsarchiv
DMA	Deutsches Museum Archiv
KARA	Kreisarchiv Rastatt
StadtAIK	Stadt- und Kreisarchiv Arnstadt
StadtAD	Stadtarchiv Düsseldorf
StadtAES	Stadtarchiv Esslingen a. N.
StadtAFR	Stadtarchiv Freiburg
StadtAHOL	Stadtarchiv Holzminden ⁸⁵⁵
StALB	Staatsarchiv Ludwigsburg
StAM	Staatsarchiv München
StASIG	Staatsarchiv Sigmaringen
TBAmtKE	Stadt Kempten, Amt für Tiefbau und Verkehr

⁸⁵⁵ Eine ausführliche Auflistung aller die Firma Liebold betreffenden Archivalien befindet sich in [Seeliger 1995]. Seeliger hat hier auch sämtliche erwähnten Bauwerke aufgeschlüsselt und damit ein sehr hilfreiches Werkzeug für die Verwendung des Firmen- und Familienarchivs von Liebold zur Verfügung gestellt.

Literaturverzeichnis

A. 1900:

A.: Beitrag zur Frage steinerner Gelenkbrücken. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 36 (1900), Nr. 16, S. 151–153.

A. B. 1897:

A. B.: Ponts en béton a rotules découvertes sur le Danube, près de Inzigkofen. In: *Le Génie Civil* Jg. 17 (1897), Nr. 30, No. 22, S. 337–339.

A. B. 1899:

A. B.: Die neue Stauffacher-Brücke in Zürich. Referat über den Vortrag des Herrn Stadtingenieurs Wenner, gehalten in der VII. Sitzung vom 8. Februar 1899. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 33 (1899), Nr. 9, S. 80–83.

A. C. 1907:

A. C.: Ponts en béton a trois rotules sur l'Iller, à Lautrach et à Kempten (Bavière). In: *Le Génie Civil* Jg. 27 (1907), Nr. 16, S. 257–260.

Aertel 2011:

Aertel, Karolin: Planungen für die Bodebrücke abgeschlossen – Baustart 2012.

Volksstimme. Online verfügbar unter

http://www.volksstimme.de/nachrichten/lokal/stassfurt/414749_Planungen-fuer-die-Bodebruecke-abgeschlossen-Baustart-2012.html, zuletzt aktualisiert am 19.08.2011, zuletzt geprüft am 21.08.2013.

Alfred Kunz GmbH & Co. KG (Hg.) 1982:

Alfred Kunz GmbH & Co. KG (Hg.): 100 Jahre Baugeschichte aktiv mitgestaltet. 1882/1982. Gräfelfing: Pera-Druck 1982.

AMdG, Sign. unbekannt:

Archives municipales de Gaillac: Device Général et Cahier des Charges d'un projet de construction d'un Hôtel de Ville etc. Présenté par nous Architecte Soussigné à Gaillac le 7 décembre 1832, Lebrun Architecte. Signatur unbekannt.

Aylet 1911:

Aylet, Philip: The Disadvantages of rigid False-work for Arch Construction. A discussion of Its Successful Elimination by a New Method Employing Suspended Flexible Centering Used in the Construction of the Chickahominy River Bridge, Richmond, Va. In: *Cement Age* Jg. 13 (1911), Nr. 6, S. 292–300.

B. 1883:

B.: Zum Kapitel der Verfälschung von Portlandzement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 17 (1883), Nr. 19; 20, S. 109–110; 115–118.

B. 1884:

B.: Aus den Verhandlungen der General-Versammlung des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten 1884. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 18 (1884), Nr. 25; 26, S. 146–148; 150–152.

Bach 1885:

Bach, Carl von: Zulässige Belastung von Blei gegenüber Druckbeanspruchung. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 29 (1885), Nr. 33, S. 629–630.

Bach 1889–1890:

Bach, Carl von: *Elasticität und Festigkeit. Die für die Technik wichtigsten Sätze und deren erfahrungsmässige Grundlage.* Berlin: Julius Springer 1889–1890.

Bach 1903a:

Bach, Carl von: Mitteilungen über die Herstellung von Betonkörpern mit verschiedenem Wasserzusatz sowie über die Druckfestigkeit und Druckelastizität derselben. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 37 (1903), Nr. 74, S. 478–479.

Bach 1903b:

Bach, Carl von: Mitteilungen über die Herstellung von Betonkörpern mit verschiedenem Wasser-Zusatz sowie über die Druckfestigkeit und Druckelastizität derselben. Stuttgart: Hofbuchdruckerei Zu Gutenberg, Grüninger (Klett & Hartmann) 1903.

Bach 1903c:

Bach, Carl von: Versuche mit Granitquadern zu Brückengelenken. In: *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen* (1903), Nr. 17, S. 59–83.

Bach 1904:

Bach, Carl von: Versuche mit Sandsteinquadern zu Brückengelenken. In: *Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens insbesondere aus den Laboratorien der technischen Hochschulen* (1904), Nr. 20, S. 1–30.

Bach 1906:

Bach, Carl von: Mitteilungen über die Druckelastizität und Druckfestigkeit von Betonkörpern mit verschiedenem Wasserzusatz. II. Teil. Stuttgart: Hofbuchdruckerei Zu Gutenberg, Grüninger (Klett & Hartmann) 1906.

Bach 1909:

Bach, Carl von: Mitteilungen über die Druckelastizität und Druckfestigkeit von Betonkörpern mit verschiedenem Wasserzusatz. III. Teil. Stuttgart: Hofbuchdruckerei Zu Gutenberg, Grüninger (Klett & Hartmann) 1909.

Barkhausen 1892:

Barkhausen, Georg: *Erdarbeiten, Straßenbau, Brückenbau.* Unter Mitarbeit von Georg Barkhausen, Nessenius und Wilhelm Housselle. Berlin: Toeche 1892. (Handbuch der Baukunde. Abth. 3, Baukunde des Ingenieurs. Bd. 4).

Bauernfeind 1854:

Bauernfeind, Carl Maximilian: *Vorlegeblätter zur Brückenbaukunde mit erläuterndem Texte.* München: Cotta'sche Buchhandlung 1854.

Baum 1969:

Baum, Siegfried: *Schwäbische Eisenbahn. Die Verkehrsgeschichte der Lokalbahnen in Mittelschwaben.* Eppstein: Zimmer 1969.

Baumbach, Vockrodt 2000:

Baumbach, Dietrich; Vockrodt, Hans-Jörg: *Historische Bogen- und Gewölbebrücken der Stadt Erfurt.* Erfurt: Habel 2000.

Bauschinger 1876:

Bauschinger, Johann: VII. Experimentelle Untersuchungen über die Gesetze der Druckfestigkeit. In: *Mittheilungen aus dem mechanisch-technischen Laboratorium der k. polytechnischen Schule in München* (1876), Nr. 6.

Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. (1925):

Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H.: Bauunternehmung Sager & Woerner G. m. b. H. Entwurf und Ausführung von Tief- und Hochbauten aller Art. (München): (Druck von G. Franz) (1925).

Bayerischer Architekten- und Ingenieur-Verein 1912:

Bayerischer Architekten- und Ingenieur-Verein: München und seine Bauten. München: Bruckmann 1912.

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege:

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege: Bayerischer Denkmal-AtlasBLfD. Online verfügbar unter <http://geoportal.bayern.de/bayernatlas-klassik/L7ExSNbPC4sb6TPJDbICAiLPd0Fv2v9OnIrPrA5rbixOP8hEaFIVXrbAcpsGQCaUdhZLLGbowYS60u-YtLhY0kUWLQgjSEXFXZJY9xbIxmY7eujiNgY-cfkr6-rk9Sdq/L7E59/ujia3/NbP8b>, zuletzt geprüft am 17.03.2015.

BWA, Sign. BWA F55/86-1:

Bayerisches Wirtschaftsarchiv: Firmenarchiv Alfred Kunz GmbH & Co. Hoch- und Tiefbauunternehmung, München. Signatur BWA F55/86-1.

BWA, Sign. BWA F100:

Bayerisches Wirtschaftsarchiv: Firmenarchiv Dyckerhoff & Widmann AG, München. Signatur BWA F100.

BWA, Sign. BWA F46:

Bayerisches Wirtschaftsarchiv: Firmenarchiv Sager & Woerner KG, München. Ausgeführte Brückenbauten. Signatur BWA F46.

Beaudemoulin 1854:

Beaudemoulin, Louis Alexis: No. 94: Notice sur l'emploi du sable dans les décintrements. In: *Annales des ponts et chaussées* (1854 2e semestre), S. 206–214.

Beaudemoulin 1857:

Beaudemoulin, Louis Alexis: No. 181: Décintrement des arches de pont au moyen du sable; perfectionnements. In: *Annales des ponts et chaussées* (1857 2e semestre), S. 222–237.

Beaudemoulin 1858:

Beaudemoulin, Louis Alexis: Ausrüstung von Brückenbögen vermittelt Sand. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 8 (1858), Nr. 43, S. 653–658.

Belgrand 1850:

Belgrand, Marie François Eugène: No. 238 Notice sur l'établissement d'une conduite destinée à amener les eaux du ru d'Aillon à Avallon, suivie de quelques considérations sur les ouvrages en ciment romain. In: *Annales des ponts et chaussées* (1850 2e semestre), S. 412–451.

Belgrand 1882:

Belgrand, Marie François Eugène: Première partie: Les Eaux; Deuxième section: Les Eaux nouvelles. Paris: Dunod 1882. (Les travaux souterrains de Paris. IV).

Bélibor 1737–1753:

Bélibor, Bernard Forest de: Architecture hydraulique. Ou l'art de conduire, d'élever et de menager les eaux pour les différents besoins de la vie. Paris: Jombert 1737–1753.

Bellsolá Bayo 1862:

Bellsolá Bayo, Ricardo: Puente de Villanueva de Cameros, en la carretera de primer orden de Soria a Logroño, y noticia de esta carretera y otras de la provincia. In: *Revista de obras públicas* Jg. 10 (1862), Nr. 24, S. 288–294.

Bellsolá Bayo 1867:

Bellsolá Bayo, Ricardo: Memoria relativa a los arcos de hormigón hidráulico construidos en la carretera de primer orden de Soria a Logroño. In: *Revista de obras públicas* Jg. 15 (1867), Nr. 2; 3; 4, S. 13–17; 25–26; 37–43.

Berthier 1896:

Berthier: Le pont de la Coulouvrenière. Nouveau pont en béton sur le Rhône, à Genève. In: *Le Génie Civil* Jg. 16 (1896), Nr. 29, No. 9, S. 129–132.

Beutel 1903; 1904:

Beutel, Ferdinand: Größere Betongewölbe-Brücken mit Gelenken und ihre Lehrgerüste. In: *Süddeutsche Bauzeitung* Jg. 13; 14 (1903; 1904), Nr. 52; 1, S. 410–412; 2–5.

Biedermann 1889–1896:

Biedermann, Woldemar Freiherr von (Hg.): Goethes Gespräche. 10 Bände. Leipzig: 1889–1896. Online verfügbar unter <http://www.zeno.org/Literatur/M/Goethe,+Johann+Wolfgang/Gespr%C3%A4che/%5BZu+den+Gespr%C3%A4chen%5D/1819>.

Biedermann 1904:

Biedermann, E.: Zur Frage der Wirtschaftlichkeit der Betonverwendung. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 24 (1904), Nr. 38, S. 241–243.

Binswanger 1903:

Binswanger, W.: Münchner Brückenbauten. I. Die Corneliusbrücke und der Einsturz eines Bogens derselben am 26. August 1902. In: *Beton und Eisen* Jg. 2 (1903), Nr. 5, S. 305–311.

Bleibtreu 1861:

Bleibtreu, Hermann: Ueber Dauerhaftigkeit des Portland-Cement-Mörtels. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 11 (1861), S. 495–502.

Blondel 1777:

Blondel, Jacques François: Cours d'architecture, ou traité de la décoration, distribution & construction des bâtiments. Unter Mitarbeit von M. Patte. Paris: Desaint 1777. (Cours d'architecture, ou traité de la décoration, distribution & construction des bâtiments. Bd. 5 von 6 Bänden).

Blumhardt 1908:

Blumhardt: Über Gelenkquadern aus Beton. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 28 (1908), Nr. 58, S. 395–396.

Bn. 1884:

Bn.: Zur Handhabung der Baupolizei in Berlin. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 18 (1884), Nr. 27, S. 157–158.

Bock 2006:

Bock, Sabine: Denkmäler der Technik-, Industrie- und Verkehrsgeschichte. In: Achim Hubel (Hg.): *Denkmalpflege. Geschichte, Themen, Aufgaben. Eine Einführung*. Stuttgart: Reclam 2006, S. 186–213.

Bock, Dolezalek 1901:

Bock, A.; Dolezalek, C.: Brücke über die Leine bei Grasdorf (Beton-Brücke mit drei Granit-Gelenken) im Zuge der Zufahrt-Strasse zum Grundwasserwerk Grasdorf der Stadt Hannover. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 47 (1901), S. 47–54; 313–338.

Boeyng 2006a:

Boeyng, Ulrich: Die Herrschaftsbrücke in Bad Teinach. Das erste weit gespannte Brückengewölbe im Königreich Württemberg. In: *Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* Jg. 35 (2006), Nr. 2, S. 65–68.

Boeyng 2006b:

Boeyng, Ulrich: Massivbrückenbau im 19. und frühen 20. Jahrhundert. Brücken im Nordschwarzwald. In: *Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* Jg. 35 (2006), Nr. 2, S. 57–64.

Boeyng 2006c:

Boeyng, Ulrich: Weitgespannte Brückengewölbe im ehemaligen Königreich Württemberg. In: *Bautechnik* Jg. 83 (2006), Nr. 7, S. 511–514.

Böhm 1881:

Böhm, H.: Zur Frage der Verbesserung von Zement- und Kalk-Mörteln. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 73, S. 406–407.

Böhm 1904:

Böhm, Theodor: Die Betonviadukte der Bahnlinie Altenburg–Langenleuba (Kgl. Sächsische Staatsbahn). In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. 1 (1904), Nr. 10, S. 37–38.

Boistard 1810:

Boistard, Louis Charles: Expériences sur la stabilité des voûtes. In: Pierre Charles Lesage (Hg.): *Recueil de divers mémoires extraits de la bibliothèque impériale des ponts et chaussées a l'usage de MM. les ingénieurs*. Paris: Firmin Didot 1810. Bd. 2, S. 171–217.

Bommersbach 2002:

Bommersbach, Ingrid: Ein kraftvoller Aufbruch. Die Bauberatung des Vereins 1902–1914. In: Wolfgang Pledl (Hg.): *Heimat erleben, bewahren, neu schaffen. Kultur als Erbe und*

Auftrag. 100 Jahre Bayerischer Landesverein für Heimatpflege e. V. München: Bayerischer Landesverein für Heimatpflege 2002, S. 109–158.

Borgnis 1823:

Borgnis, Joseph Antoine: *Traité élémentaire de Construction appliquée à l'architecture civile*. Paris: Bachelier 1823.

Borgnis 1842:

Borgnis, Guisepe Antonio: *Elementi die statica architettonica*. Mailand: Gaspare Truffi 1842.

Bösche et al. 2003:

Bösche, Thomas; Brunner, Andreas; Weigelt, Mathias; Uhlstein, Wolfgang: Die Eisenbahn-Marienbrücke Dresden. Beitrag zum 13. Dresdner Brückenbausymposium am 13. März 2003. Hg. v. Institut für Massivbau Technische Universität Dresden. Dresden. Online verfügbar unter http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_bauingenieurwesen/imb/veranstaltung_en/dbbs/13_DBBS/02_download/13bbs_03.pdf, zuletzt aktualisiert am 04.12.2014, zuletzt geprüft am 23.07.2015.

Bosse 1886:

Bosse, R.: Puzzolan-Zement und Homogenisierung. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 13, S. 76–79.

Böthcke 1795:

Böthcke, Ernst Samuel Heinrich: *Beyträge zur Lehre wie man mit möglichster Schonung des Holzes alle Landgebäude wohlfeil, dauerhaft und feuersicher bauen kann*. Berlin: Himbürg 1795.

Bourdelles 1898:

Bourdelles, Jean Baptiste: *Ponts en maçonnerie articulés aux naissances et à la clef*. In: *Annales des ponts et chaussées* (1898 3e trimestre), S. 31–92.

Brabandt 1907a:

Brabandt: Über den Einfluß der Wassermenge auf die Druckfestigkeit von Zementmörtel und Zementbeton. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 27 (1907), Nr. 30, S. 206–208.

Brabandt 1907b:

Brabandt: Über den Einfluß des Grobschlagzusatzes im Beton auf die Druckfestigkeit. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 27 (1907), Nr. 82, S. 537–540.

Braun 1886:

Braun, Paul: Ueber das Wölben grösserer Brückenbögen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 95, S. 571–572.

Braun 1893:

Braun, Paul: Betonbrücke über die Donau bei Rechtenstein (Württemberg). In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 43 (1893), S. 439–446.

Braun 1901:

Braun, Paul: Strassenbrücke aus Beton über die Donau bei Ehingen (Württemberg). In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 21 (1901), Nr. 82; 85, S. 506–507; 521–523.

Brisson 1826:

Brisson, Barnabé (Hg.): Recueil de 245 Dessins ou Feuilles de Textes Relatifs à l'Art de l'Ingénieur, Extraits de la première Collection terminée en 1820. Paris: École Royale des Ponts et Chaussées 1826.

Brosselin 1878:

Brosselin, Gustave Pierre: Note sur la Construction des Ponts en maçonnerie. Paris 1878. Archives d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Sign. 4°12538/C705.

Bruyère 1823 Bruyère, Louis: Études relatives a l'art des constructions. Bd. 1 von 2 Bänden. Paris: Bance Aîné 1823.

Btz. 1902:

Btz.: Zur Prüfung von Portland-Zement nach den "Normen für einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Zement". In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 36 (1902), Nr. 92, S. 590–592.

Bundesanstalt für Straßenwesen 2013:

Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Teil 8: Bauwerksausstattung. Abschnitt 4: Rückhaltesysteme. Online verfügbar unter http://www.bast.de/DE/FB-B/Publicationen/Regelwerke/Baudurchfuehrung/EC-ZTV-ING-Teil-8-Bauwerksausstattung-Baudurchfuehrung.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt aktualisiert am 12.2013, zuletzt geprüft am 13.03.2015.

Bundesministerium für Verkehr 1999:

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Steinbrücken in Deutschland. Band 2: Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik 1999.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2014:

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Sonderprogramm Brückenmodernisierung. Online verfügbar unter <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/IR/brueckenmodernisierung-sonderprogramm.html>, zuletzt geprüft am 18.03.2015.

Burchartz 1902:

Burchartz, H.: Die Ursachen des mangelhaften Verhaltens von Mörtel und Beton und ihre Feststellung. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 22 (1902), Nr. 98, S. 604–608.

Büsing 1892:

Büsing, Friedrich Wilhelm: Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen. Bearbeitet im Auftrage des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten. Berlin: Toeche 1892.

Büsing 1899:

Büsing, Friedrich Wilhelm: Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen. 2. Aufl. Berlin: Toeche 1899.

Büsing 1905:

Büsing, Friedrich Wilhelm: Der Portland-Cement und seine Anwendungen im Bauwesen. 3. Aufl. Berlin: Kommissions-Verlag der "Deutschen Bauzeitung" G. m. b. H. 1905.

Büsing 1912:

Büsing, Friedrich Wilhelm: Der Portland-Zement und seine Anwendungen im Bauwesen. 4. Aufl. Berlin: Deutsche Bauzeitung 1912.

Cecerle 1896:

Cecerle, Josef: Die Gewölbeversuche des österreichischen Ingenieur- und Architektenvereines. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 40 (1896), Nr. 22; 23, S. 605–609; 638–640.

Cendre 1879:

Cendre: Notice sur la construction du pont de Claix. In: *Annales des ponts et chaussées* (1879 1er semestre), S. 5–27.

Ch. 1883:

Ch.: Zum Kapitel der Verbesserung von Zement-Mörtel durch Zusatz von Kalkteig etc. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 17 (1883), Nr. 89, S. 529.

Claudel, Laroque 1860:

Claudel, Joseph; Laroque, Louis; Übersetzung Hertel A. Wilhelm: Zweiter Theil: Form- und Verbindungslehre. Weimar: B. F. Voigt 1860. (Das Maurerhandwerk in seinem ganzen Umfange theoretisch und praktisch abgehandelt. Bd. 2 von 2 Bänden).

Claudel, Laroque 1859:

Claudel, Joseph; Laroque, Louis: Pratique de l'art de construire. Maçonnerie; Terrasse et Plâtrerie. 2. Aufl. Paris: Dalmont et Dunod 1859.

Clericetti 1873:

Clericetti, Celeste: Il Principio della cerniera nelle volte. Osservazioni sperimentali e deduzioni. In: *Il Politecnico* (1873), S. 482–492; 577–590.

Clericetti 1874:

Clericetti, Celeste: Das Princip der Bruchfuge bei den Gewölben. Beobachtungen und Folgerungen. In: *Der Civilingenieur* (1874), S. 349–390.

Clericetti 1876:

Clericetti, Celeste: La cerniera ed il principio dei punti di equal pressione nelle volte. In: *Il Politecnico* (1876), S. 100–114; 167–179; 235–241; 329–339; 470–478; 535–542; 612–626; 711–720; 745–757.

Coignet 1855a:

Coignet, François: Constructions économiques en béton pisé; exposition universelle. 1855. Extrait fu journal l'Ingénieur, numéro du 1^{er} Novembre 1855. Paris: Bureaux du Journal 1855.

Coignet 1855b:

Coignet, François: Emploi du béton hydraulique. Brevet du 6 septembre 1855 (No. 24,805)1855.

Coignet 1859:

Coignet, François: Geformter Mörtel. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 3 (1859), Nr. 1, S. 13.

Coignet 1861:

Coignet, François: Bétons agglomérés appliqués à l'art de construire, notamment: à l'état monolithe et à l'état de pierres artificielles. Paris: Jousset 1861.

Cointeraux 1790:

Cointeraux, François: Ecole d'architecture rurale. Premier cahier dans lequel on apprendra soi-même à bâtir les maisons de plusieurs étages avec la terre seule. 2. Aufl. Paris: o. V. 1790.

Cointeraux, Seebaß 1989a:

Cointeraux, François de; Seebaß, Christian Ludwig: Die Pisé-Baukunst, in ihrem ganzen Umfang, oder vollständige und faßliche Beschreibung des Verfahrens, aus bloßer gestampfter Erde, ohne weitere Zuthat, Gebäude und Mauerwerk von aller Art wohlfeil, dauerhaft, feuerfest und sicher gegen Einbruch aufzuführen. Aus dem französischen Original des Herrn Cointereaux, bearbeitet und mit Zusätzen versehen von Christian Ludwig Seebaß, Professor der Philosophie bei der Universität zu Leipzig, und des dasigen kleinen Fürstenkollegii Kollegiat. Leipzig: Baumgärtner 1803; Reprint: Augsburg: Augustus Verlag 1989. (Die Pisé-Baukunst. Bd. 1 von 2 Bänden).

Cointeraux, Seebaß 1989b:

Cointeraux, François de; Seebaß, Christian Ludwig: Die Pisé-Baukunst, in ihrem ganzen Umfang, oder vollständige und faßliche Beschreibung des Verfahrens, aus bloßer gestampfter Erde, ohne weitere Zuthat, Gebäude und Mauerwerk von aller Art wohlfeil, dauerhaft, feuerfest und sicher gegen Einbruch aufzuführen. Aus dem französischen Original des Herrn Cointereaux, bearbeitet und mit Zusätzen versehen von Christian Ludwig Seebaß, Professor der Philosophie bei der Universität zu Leipzig, und des dasigen kleinen Fürstenkollegii Kollegiat. Leipzig: Baumgärtner 1803; Reprint: Augsburg: Augustus Verlag 1989. (Die Pisé-Baukunst. Bd. 2 von 2 Bänden).

Cointeraux 1793a:

Cointeraux, François; Übersetzung N. N.: Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande. Wien: Bei den Herausgebern in ihrem Bureau 1793. (Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande. Bd. 1 von 4 Bänden).

Cointeraux 1793b:

Cointeraux, François; Übersetzung N. N.: Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande: Zwote Abtheilung. Wien: Bei den Herausgebern in ihrem Bureau 1793. (Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande. Bd. 2 von 4 Bänden).

Cointeraux 1794:

Cointeraux, François; Übersetzung N. N.: Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande: Vierte Abtheilung. Wien: Bei den Herausgebern in ihrem Bureau 1794. (Praktischer Lehrbegriff der Baukunst auf dem Lande. Bd. 4 von 4 Bänden).

Colberg 1906:

Colberg, Otto: Die Illerbrücken in Kempten im Allgäu. Nach einem Vortrag des Verfassers, gehalten in der IX. Hauptversammlung des Deutschen Beton-Vereins zu Berlin 1906. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 40 (1906), Nr. 32; 34; 38; 45, S. 219–222; 232–238; 261–264; 318.

Collins 1959:

Collins, Peter: Concrete. The vision of a new architecture. London: Faber and Faber 1959.

Crelle 1843:

Crelle, August L.: Zu der Kunst feuerfest zu bauen. Berlin: Reimer 1843.

Croizette-Desnoyers 1849:

Croizette-Desnoyers, Louis Philippe: No. 217: Notice sur divers procédés employés pour fonder des piles de ponts au moyen de caissons en charpente sans fond, et sur le décintrément des arches d'une grande ouverture. In: *Annales des ponts et chaussées* (1849 2e semestre), S. 129–176.

Croizette-Desnoyers 1885:

Croizette-Desnoyers, Louis Philippe: Cours de construction des ponts. Bd. 2. Paris: Dunod 1885.

Czymay 1999:

Czymay, Christina: Die Colonie Victoriastadt. Betonhäuser in Berlin-Rummelsburg. In: Hartwig Schmidt (Hg.): Zur Geschichte des Stahlbetonbaus – Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910. Berlin: Ernst & Sohn 1999, S. 11–15.

D. R. 1888:

D. R.: Versuche über den Einfluss der Wassermenge bei der Mörtel-Bereitung. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 22 (1888), Nr. 93, S. 564.

DAV:

DAV: DAV Kletterbrücke Laupheim. Online verfügbar unter <https://www.alpenverein.de/DAV-Services/Kletterhallen-Suche/Detail/X/DAV-Kletterbruecke-Laupheim/232308/>, zuletzt geprüft am 06.03.2015.

Debauve 1873:

Debauve, Alphonse Alexis: Ponts en maçonnerie. Paris: Dunod 1873. (Manuel de l'ingénieur des ponts et chaussées. 10).

Degener 1902:

Degener: Die neue Strassenbrücke bei Luxemburg. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 22 (1902), Nr. 75, S. 461–463.

Deinhard 1964:

Deinhard, Johann Martin: Vom Caementum zum Spannbeton. Massiv-Brücken gestern und heute. In: Günter Huberti (Hg.): Vom Caementum zum Spannbeton. Beiträge zur Geschichte des Betons. 2 Bände. Wiesbaden – Berlin: Bauverlag 1964. Bd. 2.

Dejardin 1845:

Dejardin, Georges Alexandre: Routine de l'établissement des voûtes. Paris: Carilian-Gœury et Victor Dalmont 1845.

Dejardin 1860:

Dejardin, Georges Alexandre: Routine de l'établissement des voûtes. 2. Aufl. Paris: Dalmont et Dunod 1860.

Delbrück 1882:

Delbrück, Hugo: Zur Cementfrage. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 14 (1882), S. 127–128.

Der Vorstand des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten 1884:

Der Vorstand des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten: Von der Wirkung einiger Zumischmittel auf den Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 18 (1884), Nr. 61, S. 363–364.

Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1908:

Deutscher Ausschuss für Eisenbeton: Allgemeine Bestimmungen für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Bauten aus Stampfbeton. Berlin: Ernst & Sohn 1908.

Deutscher Ausschuss für Eisenbeton 1916:

Deutscher Ausschuss für Eisenbeton: Bestimmungen für die Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton, vom 13.01.1916. In: Frank Fingerloos (Hg.): Historische technische Regelwerke für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Bemessung und Ausführung. Berlin: Ernst & Sohn 2009, S. 63–91.

Deutscher Beton-Verein 1905:

Deutscher Beton-Verein: Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Bauten aus Stampfbeton. Biebrich: Zeidler 1905.

Deutscher Beton-Verein 1908:

Deutscher Beton-Verein: Bruchbelastung, ausgeführt Oktober 1908 an der Betongelenkbrücke der Düsseldorfer Ausstellung 1902, deren Ergebnisse und Schlußfolgerungen. Biebrich am Rhein: Sonderdruck 1908.

DMA, Sign. FA 010:

Deutsches Museum Archiv: Firmenarchiv Dyckerhoff & Widmann AG (DYWIDAG). Geschäftskorrespondenz. Signatur FA 010.

DMA, Sign. FA 010/267:

Deutsches Museum Archiv: Normen für die einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Cement (Fassung vom 10. Nov. 1878). Abgedruckt in einer Firmenschrift der Firma Dyckerhoff & Söhne 1878. Signatur FA 010/267.

Dewitz 1908:

Dewitz, Hermann: Der Bau von Betonbogenbrücken mit Gelenken. 2. Aufl. Hannover: Helwing 1908.

Dietrich 1882:

Dietrich, Emil: Ein Wort zu Gunsten der Stein-Brücken. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 14 (1882), S. 78–79; 93–94; 103; 110–111; 120; 126–127; 144–145; 151; 160–161.

Dietz 1904:

Dietz, Wilhelm: Der Bauunfall der äußeren Maximiliansbrücke in München. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 48 (1904), Nr. 38, S. 1407–1411.

Dieussart 1682:

Dieussart, Charles Philippe: *Theatrum Architecturae Civilis*. Güstrow: Johann Spierling 1682.

Dollinger 1870:

Dollinger: Wärterhaus aus Béton an der Oberschwäbischen Eisenbahn. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 4 (1870), Nr. 6, S. 44–45.

Dorrien 1886:

Dorrien, v.: Bau einer 4,3 m weiten Chausse-Brücke aus gestampften Zementbeton. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 31, S. 183–185.

Draux 1892:

Draux: No. 10: Notice sur la construction du viaduc du Gour-Noir sur le chemin de fer de Limoges a Brives par Uzerche. In: *Annales des ponts et chaussées* (1892 1er semestre), S. 545–596; Pl. 5–7.

Dupuit 1855:

Dupuit, Arsène Émile Juvénal (genannt Jules): Décintrement des arches de ponts au moyen de verrins. In: *Annales des ponts et chaussées* (1855 2e semestre), S. 358–360.

Dupuit 1870:

Dupuit, Arsène Émile Juvénal (genannt Jules): Traité de l'équilibre des voûtes et de la construction des ponts en maçonnerie. Paris: Dunod 1870.

dw 2013:

dw: Rettet den Aquädukt. In: *Münchener Merkur*, 14.06.2013.

Dyckerhoff 1875:

Dyckerhoff, Eugen: Ueber Herstellung von Zement-Fabrikaten. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 9 (1875), Nr. 41, S. 203–204.

Dyckerhoff 1877:

Dyckerhoff: Ueber Prüfungs-Methoden von Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 11 (1877), Nr. 38, S. 181–183.

Dyckerhoff 1878:

Dyckerhoff: Beitrag zur Bestimmung des Nutzwertes verschiedener hydraulischer Mörtelmaterialien. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 12 (1878), Nr. 7, S. 29–30.

Dyckerhoff 1879:

Dyckerhoff, Rudolf: Ueber den Einfluss der Beimischung von Kalk zu Zementmörtel bei der Anwendung zu Hoch- und Wasserbauten. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 13 (1879), Nr. 39, S. 200–202.

Dyckerhoff 1880:

Dyckerhoff, Rudolf: Eigenschaften und Festigkeit verschiedener hydraulischer Mörtel und Betonsorten, insbesondere aus Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 14 (1880), Nr. 23; 25, S. 120–122; 132–133.

Dyckerhoff 1881a:

Dyckerhoff, Rudolf: Ueber Zement- und Trassmörtel. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 45; 47, S. 260–263; 274–275.

Dyckerhoff 1881b:

Dyckerhoff, Rudolf: Wird Zementmörtel durch Zuschläge von Fettkalk verbessert? In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 61, S. 349–350.

Dyckerhoff 1882:

Dyckerhoff, Rudolf: Ueber richtige Verarbeitung von Portland-Zement zu Mörtel und Beton. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 16 (1882), Nr. 74, S. 434–435.

Dyckerhoff 1888:

Dyckerhoff, Eugen: Ueber Betonbauten. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 22 (1888), Nr. 40; 42; 46, S. 242–243; 251–254; 273–278.

Dyckerhoff 1908:

Dyckerhoff, Rudolf: Die Entstehung des "Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten e. V." seine Hauptziele und Erfolge. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. 5 (1908), Nr. 17; 18, S. 89–91; 95–96.

Dyckerhoff & Widmann AG 1888:

Dyckerhoff & Widmann AG: Über Betonbauten insbesondere Ausführungen in Stampfbeton der Firma Dyckerhoff & Widmann. Biebrich [u. a.]: Dyckerhoff & Widmann 1888.

Eau de Paris 2013a:

Eau de Paris: Exposition "Aqueducs, des chemins pour l'eau". Dossier de presse. Paris.

Online verfügbar unter

<http://www.eaudeparis.fr/fileadmin/contribution/culture/presse/DPexpoAqueducsvdef.pdf>, zuletzt aktualisiert am 11.09.2013, zuletzt geprüft am 01.09.2014.

Eau de Paris 2013b:

Eau de Paris: L'arrêt d'eau de l'aqueduc du Loing. Génie civil – Qualité de l'eau – Nouvelle desserte. Dossier de presse. Paris. Online verfügbar unter

http://www.eaudeparis.fr/uploads/tx_edevents/DPAqueducsLoingvdef.pdf, zuletzt aktualisiert am 23.10.2013, zuletzt geprüft am 01.09.2014.

Eiselen 1896:

Eiselen, Fritz: Die Umgestaltung der Bahnanlagen in Dresden. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 30 (1896), Nr. 45; 48; 49, S. 285–287; 301–303; 309–311.

Eiselen 1901:

Eiselen, Fritz: Wettbewerb um den Entwurf zu einer 2. festen Strassenbrücke über den Neckar bei Mannheim. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 35 (1901), Nr. 40; 42; 43; 44; 46; 47, S. 249–250; 261–262; 269–272; 273–275; 283; 285–286; 293–295.

Emperger 1902:

Emperger, Fritz: Der Ausdehnungs-Coëffizient von Beton. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 54 (1902), Nr. 16, S. 300.

Emperger 1908a:

Emperger, Fritz (Hg.): Bauausführungen aus dem Ingenieurwesen, Brückenbau u. Eisenbahnbau; Anwendungen des Eisenbetons im Kriegsbau. Unter Mitarbeit von Spitzer u. a. Berlin: Ernst & Sohn 1908. (Handbuch für Eisenbetonbau. Bd. 3 von 4 Bänden).

Emperger 1908b:

Emperger, Fritz (Hg.): Entwicklungsgeschichte und Theorie des Eisenbetons. Unter Mitarbeit von Förster u. a. Berlin: Ernst & Sohn 1908. (Handbuch für Eisenbetonbau. Bd. 1 von 4 Bänden).

Emperger 1909a:

Emperger, Fritz: Der Einfluß der Temperatur auf Bogenbrücken aus Eisenbeton. In: *Beton und Eisen* Jg. 8 (1909), Nr. 16, S. 380–381.

Emperger 1909b:

Emperger, Fritz: Temperaturspannungen im Eisenbeton. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 61 (1909), Nr. 22; 23, S. 349–353; 369–372.

Emperger 1911:

Emperger, Fritz (Hg.): Brückenbau. Unter Mitarbeit von Willy Gehler, Theodor Gesteschi und Otto Colberg. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn 1911. (Handbuch für Eisenbetonbau. Bd. 6 von 12 Bänden).

Emperger 1932:

Emperger, Fritz (Hg.): Bogenbrücken. Unter Mitarbeit von Joseph Melan und Theodor Gesteschi. 4. Neubearb. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn 1932. (Handbuch für Eisenbetonbau. Bd. 11 von 14 Bänden).

Engel 1847:

Engel, Friedrich: Der Bau in Kalk-Sand-Pisé. In: *Romberg's Zeitschrift für praktische Baukunst* (1847), S. 9–14.

Engel 1851:

Engel, Friedrich: Der Kalk-Sand-Pisébau. Anleitung zur Kunst: Gebäude von gestampftem Mörtel auszuführen, nach eigenen sowie mit Benutzung der besten bisher gemachten Erfahrungen, besonders für die Bedürfnisse des landwirtschaftlichen Publicums. Wriezen a. D.: Roeder 1851.

Engel 1865:

Engel, Friedrich: Der Kalk-Sand-Pisébau und die Kalksand-Ziegelfabrikation. 3. verb. und verm. Aufl. Leipzig: Seemann 1865.

Engesser 1881:

Engesser, Friedrich: Ueber die Festigkeit von Beton-Bogen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 103, S. 580–583.

Engesser 1900:

Engesser, Friedrich: Ueber die Beanspruchung des Baugrundes bei den Widerlagern von Bogenbrücken. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 20 (1900), Nr. 51, S. 308–309.

Erdmenger 1878:

Erdmenger, Ludwig: Zementprüfung in der alltäglichen Baupraxis. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 12 (1878), Nr. 46; 48, S. 234–236; 244–246.

Erdmenger 1880:

Erdmenger, Ludwig: Eine Bemerkung über Festigkeitserhöhung von Portland-Zement-Mörtel durch Zusätze. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 14 (1880), Nr. 85, S. 461.

Färber 1908:

Färber, Richard: Dreigelenkbogenbrücken und verwandte Ingenieurbauten. Neue Hilfsmittel und Methoden der rationellen Formbestimmung. Stuttgart: Wittwer 1908.

Färber 1916:

Färber, Richard: Der Gewölbebau. Neue Hilfsmittel für Berechnung und Bauausführung. Berlin: Verlag der Deutschen Bauzeitung 1916.

Fatio 1911:

Fatio, Charles: Die Eisenbahnbrücke über den Neckar in Tübingen. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 57 (1911), Nr. 18, S. 241–246.

Féline-Romany 1866:

Féline-Romany, Edmond-Jules: N° 129: Notice sur la construction d'une arche d'essai très-surbaissée. In: *Annales des ponts et chaussées* (1866 2e semestre), S. 10–17.

Felletin et al. 1993, 2008:

Felletin, Marthe; Illaire, Martine; Habib, Danis: Ingénieurs des Ponts-et-Chaussées (1748–1932) – Inventaire-Index Ministère des Travaux Publics, Archives Nationales. Paris. Online verfügbar unter

http://www.archivesnationales.culture.gouv.fr/chan/chan/fonds/edi/sm/sm_pdf/F14%20Ingenieurs%20Ponts.pdf, zuletzt geprüft am 11.08.2014.

Fernández Ordóñez 1978:

Fernández Ordóñez, José A.: Eugène Freyssinet. Barcelona: 2 C Ediciones 1978.

Fernández Ordóñez 2012:

Fernández Ordóñez, José Antonio: Eugène Freyssinet. Paris: Éd. du Linteau 2012.

Ferré 1858:

Ferré: Maison de garde dans le bois de Vincennes. Construction en Béton. In: *L'illustration, Journal Universelle* (1858), Nr. vom 31. Juli, S. 68.

Fiedler 2008:

Fiedler, Rembrandt: Monumente der Arbeitswelt: Die Anfänge der Industriedenkmalpflege in Bayern. In: Egon Johannes Greipl (Hg.): 100 Jahre Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege. 4 Bände. Regensburg: Pustet 2008. Bd. 3, S. 371–381.

Fingerloos 2009:

Fingerloos, Frank (Hg.): Historische technische Regelwerke für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau. Bemessung und Ausführung. Berlin: Ernst & Sohn 2009.

Flamant 1887:

Flamant: N° 47: Résistance a l'écrasement des pierres partiellement chargées. In: *Annales des ponts et chaussées* (1887 2e semestre), S. 230–240.

Flaminius 1838:

Flaminius, Emil: Bemerkungen auf einer Reise in England im Sommer 1837. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 3 (1838), S. 59–89.

Fleck 1904:

Fleck, Georg: Die Syratalbrücke in Plauen i. V. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 38 (1904), Nr. 57; 58, S. 354–358; 361–362.

Foerster 1898:

Foerster, M.: Neue Brückenbauten des In- und Auslandes. In: *Süddeutsche Bauzeitung* Jg. 8 (1898), Nr. 12–15, S. 89–91; 100–102; 110–112; 117–120.

Föppl 1901:

Föppl, August: Reibung in Brückengelenken. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 21 (1901), Nr. 32, S. 197–198.

Fr. E. 1902a:

Fr. E. (verm. Fritz Eiselen): Die neue Strassenbrücke bei Luxemburg. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 36 (1902), Nr. 82; 83; 84, S. 521–523; 533; 537–538.

Fr. E. 1902b:

Fr. E. (verm. Fritz Eiselen): Von der Industrie- und Kunstausstellung in Düsseldorf 1902. VI. Die Ausstellung des "Vereins deutscher Portland-Cement-Fabrikaten" und des "Deutschen Beton-Vereins". In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 36 (1902), Nr. 66; 68; 70, S. 421–426; 435–438; 447–451.

Fr. E. 1903a:

Fr. E. (verm. Fritz Eiselen): Albula-Bahn von Thusis nach St. Moritz im Engadin. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 37 (1903), Nr. 70; 71; 74; 75; 76; 77; 78, S. 449–450; 453–455; 457; 473; 481–485; 493–496; 501–502.

Fr. E. 1903b:

Fr. E. (verm. Fritz Eiselen): Die Verhandlungen des "Deutschen Beton-Vereins". In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 37 (1903), Nr. 18, S. 114–115.

Fr. E. 1910:

Fr. E. (verm. Fritz Eiselen): Stampfbeton-Straßenbrücke (Walnut-Lane-Bridge) im Fairmount-Park zu Philadelphia. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 44 (1910), Nr. 5; 7; 8, S. 25–27; 41–45; 49–52.

Frank 1916:

Frank, Wilhelm: Rationelle Berechnung und Formgebung von Dreigelenk-Brückenbogen aus Beton. Stuttgart: Konrad Wittwer 1916.

Frauenholz 1875:

Frauenholz, Wilhelm: Erster Band: Steinconstructions. München: Theodor Ackermann 1875. (Bau-Constructions-Lehre für Ingenieure. Als Leitfaden zu seinen Vorträgen. Bd. 1).

Freistaat Bayern 2009:

Freistaat Bayern: Gesetz zum Schutz und zur Pflege der Denkmäler. Denkmalschutzgesetz (DSchG), vom 27.07.2009. Fundstelle: BayRS IV, 354 (2242-1-WFK). Online verfügbar unter <http://www.blfd.bayern.de/medien/dsg.pdf>, zuletzt geprüft am 23.09.2014.

Fresenius, Fresenius 1885:

Fresenius, R.; Fresenius, W.: Ueber Portlandzement und über den Nachweis von fremden Zusätzen zu demselben. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 19 (1885), Nr. 1, S. 6–7.

Freudenreich 2003:

Freudenreich, Sonja Maria: Die Baumeisterfamilie Buck. 100 Jahre Architekturgeschichte in Ehingen. In: Wolfgang Schürle und Nicola Assmann (Hg.): *Bausteine zur Geschichte*. Ulm: Alb-Donau-Kreis 2003, S. 123–196.

Freyssinet 1921:

Freyssinet, Marie Eugène: Le pont de Villeneuve-sur-Lot (Lot-et-Garonne). Perfectionnement dans la construction des grandes voûtes. In: *Le Génie Civil* Jg. 41 (1921), Nr. 79, No. 5; 6, S. 97–102; 124–128.

Freyssinet 1923:

Freyssinet, Marie Eugène: N° 9 Le pont Candelier. Pont-rail en béton armé sur la Sambre. Arc de 64 mètres de portée sous la ligne Paris–Berlin. In: *Annales des ponts et chaussées* (1923 1er semestre), S. 165–197.

Freyssinet 1949:

Freyssinet, Marie Eugène: Souvenirs. In: *Travaux, Supplément: Cent ans de béton armé: 1849–1949* (1949), Nr. 194, S. 51–61.

Frühling 1883:

Frühling, Hermann: Zum Kapitel der Verfälschung des Portland-Zements. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 17 (1883), Nr. 78, S. 466–467.

Fuller, Thompson 1907:

Fuller, William Barnard; Thompson, Sanford Eleazer: The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Jg. 59 (1907), 67–143. (Mit einer Diskussion der Ergebnisse auf S. 144–172)

G. 1894:

G.: Einfluss der Korngrösse auf die Festigkeit von Cement und Cementmörtel. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 14 (1894), Nr. 16, S. 163–164.

G. 1900:

G.: Mittheilungen aus Vereinen. Architekten- und Ingenieurverein zu Wiesbaden. Versammlung am 05. Dezember 1899. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 34 (1900), Nr. 2, S. 14.

G. 1906:

G.: Versammlungen der Vereine der Baustoffgewerbe. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 26 (1906), Nr. 19, S. 125–128.

G. M. 1896:

G. M.: Referat über den Vortrag von Professor W. Ritter: Über den Neubau der Coulouvrenière-Brücke in Genf. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 27/28 (1896), Nr. 14, S. 100–101.

G. M. 1899:

G. M.: Betongelenke in Steinbrücken. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 34 (1899), Nr. 1, S. 10.

G.-z. 1896:

G.-z.: Mittheilungen aus dem Architekten- und Ingenieurverein, Ortsverein Wiesbaden. Protokoll zu einem Vortrag von Eugen Dyckerhoff: "Ausgeführte Betonbauten". In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 30 (1896), Nr. 24, S. 154–155.

Gaedertz 1881:

Gaedertz, Alfred: Concurrenz für die Rheinbrücke von Mainz nach Castel. In: *Die Eisenbahn – Le Chemin de Fer* Jg. 14 (1881), Nr. 21; 23; S. 122–124; 133; 139–142.

Gaedertz 1898:

Gaedertz, Alfred: Pont en béton avec articulations en granit sur la Eyach, près d'Imnau. In: *Annales des ponts et chaussées* (1898 2me trimestre), S. 364–366.

Gaertner 1892:

Gaertner, Ernst: Bericht des Gewölbe-Ausschusses. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 44 (1892), Nr. 10, S. 166–167.

Gaertner 1893:

Gaertner, Ernst: Bericht des Gewölbe-Ausschusses. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 45 (1893), Nr. 10, S. 161–163.

Gallotti 1903:

Gallotti, Paul: Béton armé et Rotule. In: *Le Béton Armé – Organe des Concessionnaires et Agents du Système Hennebique* Jg. 5 (1903), Nr. 58, S. 167–171.

Gary 1912:

Gary, Max: Versuche mit Stampfbeton. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 46 (1912), Nr. 8; 9, S. 60–62; 71–72.

Gauthey, Navier 1813:

Gauthey, Émiland-Marie; Navier, Claude Louis Marie Henri (Hg.): *Traité de la construction des ponts*. Paris: Firmin Didot 1813. (Oeuvres de M. Gauthey. Bd. 3 von 3 Bänden).

Gilbrin 1913:

Gilbrin, Georg: Störungen des normalen Zustandes in Brückengewölben. Von der Kgl. Technischen Hochschule zu München zur Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs) genehmigte Dissertation. Berlin: Ernst & Sohn 1913.

Gilly 1797:

Gilly, David: *Handbuch der Land-Bau-Kunst, vorzüglich in Rücksicht auf die Construction der Wohn- und Wirthschafts-Gebäude für angehende Cameral-Baumeister und Oeconomen*. Erster Theil. Berlin: Friedrich Vieweg dem älteren 1797.

Göhner 2013:

Göhner, Wolfgang Karl: *Denkmalschutzgesetze der Länder in der Bundesrepublik Deutschland*. Online verfügbar unter <http://www.blfd.bayern.de/medien/dsg-brd-201302.pdf>, zuletzt aktualisiert am 11.02.2013, zuletzt geprüft am 06.03.2015.

Goiffon 1772:

Goiffon, Georges-Claude: L'Art du Maçon Piseur. In: François Rozier (Hg.): Introduction aux observations sur la physique, sur l'histoire naturelle et sur les arts. 2 Bände. Paris: Le Jay und Barrois 1772. Bd. 1, S. 682–697.

Göner 1964:

Göner, Herbert: Das Verhalten der Syratalbrücke in Plauen i. V. seit ihrer Erbauung. In: Association Internationale des Ponts et Charpentes (Hg.): Publication Préliminaire. Septième congrès de l'Association Internationale des Ponts et Charpentes, Rio de Janeiro. 10–16.08. 1964. Zürich: Leemann 1964, S. 941–950.

Gourlier 1832a:

Gourlier, Charles Pierre: Bericht über eine Abhandlung des Hrn. Lebrun d. jüng., Baumeister zu Alby, Dept. du Tarn, die Anwendung des Grund- oder Steinmörtels (béton) zum Baue ganzer Wohnhäuser betreffend. In: *Dinglers Polytechnisches Journal* Jg. 46 (1832), Nr. 2, S. 114–119.

Gourlier 1832b:

Gourlier, Charles Pierre: Rapport fait par M. Gourlier, au nom du Comité des arts économiques, sur un mémoire de M. Lebrun jeune, architecte à Alby, département du Tarn, relatif à l'emploi du béton pour la construction entière d'une maison d'habitation. In: *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* Jg. 31 (1832), S. 99–103.

Gourlier et al. 1847Gourlier, Charles Pierre; Biet; Grillon; Feu Tardieu: Choix d'édifices publics projetés et construits en France depuis le commencement du XIXe siècle. Bd. 2 von 3 Bänden. Paris1847.

Großmann 1861:

Großmann: Ueber den Pisé- und Bétonbau. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 5 (1861), Nr. 4, S. 49–55.

Gugenhan 1894:

Gugenhan: Beton-Brücke über die Donau bei Munderkingen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 28 (1894), Nr. 80, S. 493–495.

Güntheroth, Kahlow 2006:

Güntheroth, Nele; Kahlow, Andreas: Von Mühlhausen in die Neue Welt. Der Brückenbauer J. A. Röbling (1806–1869). Mühlhausen/Thür.: Mühlhäuser Museen 2006. (Mühlhäuser Beiträge. Sonderheft. 15).

Güntzel 1986:

Güntzel, Jochen Georg: Zur Geschichte des Lehmbaus in Deutschland. Massive Lehmbauten: Geschichte, Techniken, Verbreitung. Dissertation, Fachbereich Architektur, Gesamthochschule Kassel – Universität des Landes Hessen, Kassel, 22.10.1986.

H. 1889:

H.: Die Verwendung des Betonmörtels aus Portland-Zement bei Berliner Hochbauten. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 23 (1889), Nr. 57, S. 342–343.

H. 1896:

H.: Die Gewölbeprouben des österreiehisehen Ingenieur- und Architekten-Vereins. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 30 (1896), Nr. 14; 16; 19, S. 87–88; 98–101; 117–120.

H. 1898a:

H.: Belastungsproben gewölbter Strassenbrücken. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 32 (1898), Nr. 89, S. 575–579.

H. 1898b:

H.: Gewölbte Brücken mit Scheitelgelenk und Kämpfer-Doppelgelenken. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 32 (1898), Nr. 93, S. 600.

H. 1900:

H.: Beanspruchung schiefer gewölbter Bögen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 34 (1900), Nr. 103/4, S. 635.

H. M. 1896:

H. M.: Mittheilungen aus Vereinen. Württembergischer Verein für Baukunde. Versammlung am 30. November 1895. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 30 (1896), Nr. 1, S. 7.

Haanen 1872:

Haanen, Edmund van: Anwendung von Béton zur Herstellung von Wohngebäuden. Vortrag gehalten in der Wochenversammlung des Vereins am 11. Mai 1872. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 24 (1872), Nr. 10, S. 295–298.

Haberkalt 1908:

Haberkalt, Karl: Die Berechnung der Tragwerke aus Beton-Eisen oder Stampfbeton bei Hochbauten und Strassenbrücken. Wien: Eberle 1908.

Hackelsberger 1981:

Hackelsberger, Christoph: München und seine Isar-Brücken. München: H. Hugendubel 1981.

Hacker 1897:

Hacker: E. H. Hoffmann †. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 31 (1897), Nr. 17, S. 106–108.

Haegermann et al. 1964:

Haegermann, Gustav; Huberti, Günter; Möll, Hans: Vom Caementum zum Spannbeton. Vom Caementum zum Zement; Die erneuerte Bauweise; Der Spannbeton. In: Günter Huberti (Hg.): Vom Caementum zum Spannbeton. Beiträge zur Geschichte des Betons. 2 Bände. Wiesbaden – Berlin: Bauverlag 1964. Bd. 1.

Hager 2014:

Hager, Katrin: Fortschritt bei heimlichem WahrzeichenMerkur-Online.de. Online verfügbar unter <http://www.merkur-online.de/lokales/region-holzkirchen/valley/fortschritt-heimlichem-wahrzeichen-3885166.html>, zuletzt aktualisiert am 20.09.2014, zuletzt geprüft am 30.01.2015.

Harding 1837:

Harding, George J.: V. Description of a Concrete Bomb-Proof erected at Woolwich, with Detailed Experiments as to the Effect produced on it by Fire of Artillery. In: *Papers on subjects connected with the duties of the corps of royal engineers* (1837), S. 33–42.

Hartmann 1858:

Hartmann, C.: Praktische Anweisung zu der Construction schiefer Brücken mit Spiralschichten. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 2 (1858), Nr. 7, S. 102–108.

Hassler, Schmidt 2004:

Hassler, Uta; Schmidt, Hartwig (Hg.): Häuser aus Beton. Vom Stampfbeton zum Großtafelbau. Tübingen: Wasmuth 2004.

Heigelin 1827:

Heigelin, Karl Marcell: Handbuch der neuesten ökonomischen Bauarten. Tübingen: Osiander 1827.

Heigelin 1828:

Heigelin, Karl Marcell: Lehrbuch der höheren Baukunst für Deutsche. Leipzig: Friedrich Fleischer 1828. (Lehrbuch der höheren Baukunst für Deutsche. Bd. 1 von 3 Bänden).

Heinzerling 1868:

Heinzerling, Friedrich: Historische Uebersicht über die Anwendung des Eisens zu Brückenbauten und deren Ergebnisse für die Wahl ihres Konstruktionssystems und Eisenmaterials. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 33 (1868), S. 67–95.

Heinzerling 1870:

Heinzerling, Friedrich: Die Brücken in Eisen. Baumaterial, technische Entwicklung, Konstruktion und statische Berechnung der eisernen Brücken. Für Ingenieure, Eisenbautechniker und technische Lehranstalten. Leipzig: Spamer 1870. (Die Schule der Baukunst. Handbuch für Architekten, Ingenieure und technische Schulen. Bd. 2, 4. Abtheilung).

Heinzerling 1872a:

Heinzerling, Friedrich: Analytisch-graphische Construction der Brückengewölbe mit Berücksichtigung ihrer größten einseitigen Belastung. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 22 (1872), S. 423–448; 559–574.

Heinzerling 1872b:

Heinzerling, Friedrich: Theorie, Konstruktion und statische Berechnung der Brückengewölbe nebst Ermittlung der hierzu erforderlichen Erfahrungswerthe. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 37 (1872), S. 246–289.

Heinzerling 1875:

Heinzerling, Friedrich: Steinerne Brücken. Heft I: Durchlässe, Viaducte und kleine Brücken. Aachen: J. A. Mayer 1875. (Die Brücken der Gegenwart. 2).

Heinzerling 1891:

Heinzerling, Friedrich: Durchlässe und kleine gewölbte Brücken. Zum Gebrauche bei deren Berechnen, Entwerfen und Veranschlagen. 2. völlig umgearbeitete und stark vermehrte Auflage. Berlin: Loewenthal 1891.

Heinzerling 1900:

Heinzerling, Friedrich: Steinerne Brücken. Strombrücken, Thalbrücken, Canalbrücken und schiefe Brücken in Stein, Beton und Beton mit Eiseneinlagen, mit Gelenken und ohne

Gelenke. Zum Gebrauche bei deren Berechnen, Entwerfen und Veranschlagen. 2. völlig umgearbeitete und stark vermehrte Auflage. Berlin: Loewenthal 1900.

Held 1808:

Held, Karl: Der Pisee oder Stampf-Bau. Hildesheim: Gerstenberg 1808.

Hensel 1904:

Hensel: Die Senkung der Maximilians-Brücke in München. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 38 (1904), Nr. 55, S. 339–342.

Herbach 2004:

Herbach, Jens: Eisenbahnen in Sachsen auf www.sachsenschiene.net. Brücke Pleißebach (LWd-Linie) [Kändler]. Online verfügbar unter http://www.sachsenschiene.net/bahn_alt/index.htm?http://www.sachsenschiene.net/bahn_alt/kun/pag_kun74.htm, zuletzt geprüft am 27.08.2014.

Hermanek 1897:

Hermanek, Johann: Einfluss von Temperaturschwankungen auf Gewölbe. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 49 (1897), Nr. 27, S. 419–427.

Hermann 1911:

Hermann, Gustav: Reichsstrassenbrücke über die Save in Krainburg. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 76 (1911), S. 61–69.

Hermsdorf 2014:

Hermsdorf, Sabine: Neue Brücke wird richtig teuer. In: *Münchner Merkur*, 04.07.2014.

Herosé 1893:

Herosé, Chs: Betonbrücke in Erlisbach. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 22 (1893), Nr. 1, S. 7–8.

Hertz 1881:

Hertz, Heinrich: Ueber die Berührung fester elastischer Körper. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* Jg. 92 (1881), S. 156–171.

Hertz 1882:

Hertz, Heinrich: Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte. In: *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes* (1882), S. 449–463.

Heuser 1872:

Heuser, C.: Zur Stabilitäts-Untersuchung der Gewölbe. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 6 (1872), Nr. 45; 46, S. 365–366; 373–376.

Hoch 1904:

Hoch, Anton: Beton-Probebogen der Stuttgarter Zementfabrik Blaubeuren in Ehingen. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 48 (1904), Nr. 39, S. 1463–1465.

Hoch 1904b:

Hoch, Anton: Was ist besser: erdfeucht, plastisch oder nass zubereiteter Beton? In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 48 (1904), Nr. 39, S. 1461–1463.

Hoffmann 1858:

Hoffmann, E. H.: Mittheilungen über Gewölbe aus Stampfmörtel. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 8 (1858), S. 453–456.

Hoffmann 1860:

Hoffmann, E. H.: Ueber Anwendung von Stampfmörtel bei kleinen Brückengewölben. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 10 (1860), S. 263–266.

Hoffmann 1872a:

Hoffmann, E. H.: Massive Brücke von 8,16 m Weite bei Lübars. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 6 (1872), S. 260–261.

Hoffmann 1872b:

Hoffmann, E. H.: Über Gewölbe aus Gussmörtel, deren Festigkeit, Kosten und ihr Verhalten, verglichen mit Gewölben von Ziegelsteinen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 6 (1872), S. 384.

Hoffmann 1873a:

Hoffmann, E. H.: Die Ueberwölbung des Gerberbaches in der Stadt Schaffhausen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 7 (1873), Nr. 20; 24, S. 75–76; 93.

Hoffmann 1873b:

Hoffmann, E. H.: Ueber ausgeführte gewölbte Bauten. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 17 (1873), Nr. 4; 5, S. 49–51; 65–67.

Hoffmann 1878a:

Hoffmann, E. H.: Eisen, Holz und Stein im Brückenbau unter vielfacher Bezugnahme auf Veröffentlichungen in Fachzeitschriften vornämlich auf Bauwerke in Deutschland auch auf österreichische und französische Bauten. Leipzig: G. Knapp's Verlagsbuchhandlung 1878.

Hoffmann 1878b:

Hoffmann, E. H.: Ueber Steinbögen und Steinbrücken. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 10 (1878), S. 21–22; 35–36; 45–46; 51–52; 66–67; 82–83; 85; 100–101.

Hoffmann 1880:

Hoffmann, E. H.: Steinerne Brücken. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 12 (1880), S. 310–311.

Holzer 2010a:

Holzer, Stefan M.: Initiative zum Erhalt der Teufelsgrabenbrücke gegründet. Der Universitätsprofessor Dr.-Ing. Stefan M. Holzer hat eine Initiative zum Erhalt der Teufelsgrabenbrücke im oberbayerischen Valley (Landkreis Miesbach) gegründet Bayerische Ingenieurekammer-Bau. Online verfügbar unter <http://www.bayika.de/de/aktuelles/kurznachrichten/denkmalpflege/2010-03-08.php?navanchor=2110037>, zuletzt aktualisiert am 08.03.2010, zuletzt geprüft am 21.08.2013.

Holzer 2010b:

Holzer, Stefan M.: München: Aufruf „Rettet die Teufelsgrabenbrücke: Stampfbetonaquädukt von 1890!“ industrie-kultur. Magazin für Denkmalpflege, Landschaft, Sozial-, Umwelt- und Technikgeschichte. Online verfügbar unter <http://www.industrie-kultur.de/index.php?name=News&file=article&sid=487>, zuletzt geprüft am 21.08.2013.

Holzer 2010c:

Holzer, Stefan M.: "Rettet den Teufelsgraben-Aquädukt (1890)" – Standsicherheitsbewertung eines Stampfbetonbauwerks vor dem Hintergrund seiner Herstellungsgeschichte. In: Tagungsband zum BAW-Kolloquium "Erhaltung von Wasserbauwerken und Brücken". Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe. 15.–16.06.2010. S. 40–43. Online verfügbar unter <http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/07-holzer.pdf>, zuletzt geprüft am 12.06.2015.

Holzer 2010d:

Holzer, Stefan M.: Rettet die Teufelsgrabenbrücke (Stampfbetonaquädukt von 1890)! In: *Bautechnik* Jg. 87 (2010), Nr. 3, S. 194.

Holzer 2012:

Holzer, Stefan M.: Innovation in 19th century vaulted bridge construction. In: Robert Carvais, André Guillerme, Valérie Nègre und Joël Sakarovitch (Hg.): *Nuts & bolts of construction history*. Bd. 3. Fourth International Congress on Construction History, Paris. 03.–07.07.2012. 3 Bände. Paris: Picard 2012, S. 589–598.

Holzer 2013:

Holzer, Stefan M.: Statische Beurteilung historischer Tragwerke. Mauerwerkskonstruktionen. Bd. 1 von 2 Bänden. Berlin: Ernst & Sohn 2013.

Holzer 2014a:

Holzer, Stefan M.: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 1: Molen und Wellenbrecher (1597–1850). In: *Bautechnik* Jg. 91 (2014), Nr. 12, S. 884–891.

Holzer 2014b:

Holzer, Stefan M.: Mixing concrete. Remarks on the early history of modern concrete. In: James W. P. Campbell, Wendy Andrews, Nicholas Bill, Karey Draper, Patrick Fleming und Yiting Pan (Hg.): *Proceedings. First Conference of the Construction History Society*. Queen's College, Cambridge. 11.–12.04.2014. Ascot: Construction History Society 2014, S. 219–230.

Holzer 2014c:

Holzer, Stefan M.: Unsichtbarer Beton. Bemerkungen zur vierhundertjährigen Geschichte eines Ingenieurwerkstoffs. In: Bundesingenieurekammer (Hg.): *Ingenieurbaukunst 2015. Made in Germany*. Berlin: Ernst & Sohn 2014, S. 184–193.

Holzer 2015:

Holzer, Stefan M.: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 2: Schleusen und Docks. In: *Bautechnik* Jg. 92 (2015), Nr. 3, S. 230–237.

Holzer, Veihelmann 2015:

Holzer, Stefan M.; Veihelmann, Karen: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 4: Bögen und Gewölbe (1782–1877). In: *Bautechnik* Jg. 92 (2015).

Holzer, Veihelmann 2015:

Holzer, Stefan M.; Veihelmann, Karen: Hinges in historic concrete and masonry arches. In: *Proceedings of the ICE – Engineering History and Heritage* (2015), S. 1–11.

Holzer, Voigts 2011:

Holzer, Stefan M.; Voigts, Clemens: Der Teufelsgrabenaquädukt (1890) – Bauen mit Stampfbeton im Dienste des Wassers. In: *architectura* Jg. 41 (2011), Nr. 1, S. 95–112.

Housselle 1878a:

Housselle, Wilhelm: Über die Ausführung von Gewölben. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 12 (1878), Nr. 100, S. 509–511.

Housselle 1878b:

Housselle, Wilhelm: Ueber Ausführung von Bruchstein-Mauerwerk. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 12 (1878), Nr. 4, S. 13–15.

Hubel 2006:

Hubel, Achim (Hg.): Denkmalpflege. Geschichte, Themen, Aufgaben. Eine Einführung. Stuttgart: Reclam 2006 (Reclams Universal-Bibliothek, 18358).

Huberti 1964:

Huberti, Günter (Hg.): Vom Caementum zum Spannbeton. Beiträge zur Geschichte des Betons. 2 Bände. Wiesbaden – Berlin: Bauverlag 1964.

Huerta Fernández 2008:

Huerta Fernández, Santiago: The Analysis of Masonry Architecture: A Historical Approach. In: *Architectural Science Review* Jg. 51 (2008), Nr. 4, S. 297–328.

Huerta Fernández, Kurrer 2008:

Huerta Fernández, Santiago; Kurrer, Karl-Eugen: Zur baustatischen Analyse gewölbter Steinkonstruktionen. In: *Mauerwerk-Kalender* (2008), S. 373–422.

Humbert 1897:

Humbert: N° 37: Président Leibbrand. – Un pont en béton sur le Danube près de Munderkingen. – Stuttgart, 1894. In: *Annales des ponts et chaussées* (1897 3e trimestre), S. 356–358.

Huss 1884:

Huss, Ludwig: Der Unterbau und die Brücken der Arlbergbahn. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 36 (1884), S. 84–95.

Huss 1893:

Huss, Ludwig: Mittheilungen über die großen gewölbten Brücken der k. k. Staatsbahn Stanislau–Woronienka. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 45 (1893), Nr. 42, S. 545–547.

ICOMOS 2003:

ICOMOS: ICOMOS Charter – principles for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage. Ratified by the ICOMOS 14th General Assembly in Victoria Falls, Zimbabwe, in 2003. Online verfügbar unter http://www.international.icomos.org/charters/structures_e.pdf, zuletzt aktualisiert am 15.04.2004, zuletzt geprüft am 18.03.2015.

Intze 1870:

Intze, Otto: Neue Ausrüstungsmethode für grössere Gewölbe. Angewandt beim Neubau

der St. Annenbrücke in Hamburg. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 4 (1870), Nr. 7; 8, S. 49–52; 57–58.

Intze 1876:

Intze, Otto: Rezension zu Frauenholz, Wilhelm: Baukonstruktionslehre für Ingenieure. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 22 (1876), S. 375–378.

Jähnike 1903:

Jähnike: Betonbau. Vortrag beim Elsass-Lothringer Bezirksverein. Sitzung vom 18. März 1903. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 47 (1903), Nr. 41, S. 1496–1497.

Janensch 1895:

Janensch: Anwendung der Bruchstein-Cement-Bauweise bei Eisenbahnbrücken. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 15 (1895), Nr. 37, S. 397–399.

John 1819:

John, Johann Friedrich: Ueber Kalk und Mörtel im Allgemeinen und den Unterschied zwischen Muschelschalen- und Kalksteinmörtel insbesondere; nebst Theorie des Mörtels. Berlin: Duncker und Humblot 1819. (Reprint: o. O. Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1926. 1926).

Jori, Schaechterle 1911a:

Jori, Anton; Schaechterle, Karl: Neuere Bauausführungen in Eisenbeton bei der württembergischen Staatseisenbahnverwaltung. I. Bogenbrücken. Erweiterter Sonderdruck aus der Zeitschrift "Beton u. Eisen" 1911. Berlin: Ernst & Sohn 1911.

Jori, Schaechterle 1911b:

Jori, Anton; Schaechterle, Karl: Neuere Bauausführungen in Eisenbeton bei der württembergischen Staatseisenbahnverwaltung. In: *Beton und Eisen* Jg. 10 (1911), Nr. 1; 2, S. 4–7; 29–32.

K. 1881:

K.: Mittheilungen aus Vereinen. Architekten- und Ingenieurverein zu Hannover. Versammlung am 23. Februar 1881. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), S. 120.

K. 1909:

K.: Mittheilungen aus Vereinen. Versammlung des Sächsischen Ingenieur- und Architekten-Vereins vom 30. November 1908. Vortrag Gehler: Ueber Belastungs- und Bruchversuche an Brückenbauwerken. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 43 (1909), Nr. 32, S. 215–216.

Kadach 2012:

Kadach, Marlene: Aquädukt: Gefährdete Schönheit. Merkur-Online.de. Online verfügbar unter <http://www.merkur-online.de/lokales/miesbach/holzkirchen/aquaedukt-gefaehrdete-schoenheit-2567508.html>, zuletzt aktualisiert am 25.10.2012, zuletzt geprüft am 28.01.2015.

Kahlow 1999:

Kahlow, Andreas: Stampfbeton. Frühe Anwendungsbeispiele im Hochbau. In: Hartwig Schmidt (Hg.): Zur Geschichte des Stahlbetonbaus – Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910. Berlin: Ernst & Sohn 1999, S. 16–26.

Kaiser, Schrödter 1909:

Kaiser; Schrödter: Eisen-Portlandzement, Portlandzement und die Schlackenmischfrage. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. VI (1909), Nr. 20, S. 83–84.

Kandler 2008:

Kandler, Udo: Aachen–Montzen–Tongeren von der Kriegsbahn zur Gütermagistrale. In: *Eisenbahn-Kurier* (2008), Nr. 42, S. 64–68.

Kepler 1896; 1897:

Kepler: Betonbrücke mit Bleigelenken über den Hammerkanal in Esslingen a. N. In: *Süddeutsche Bauzeitung* Jg. 6 u. 7 (1896; 1897), Nr. 51; 52; 1, S. 447–451; 456–459; 7.

Kinzer 1884:

Kinzer, K.: Die Wäldlitobel-Brücke der Arlbergbahn. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 4 (1884), Nr. 25, S. 249–251.

Kling 1902:

Kling, A.: Die Max-Josef-Brücke in München. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 22 (1902), Nr. 69, S. 427.

Km. 1889:

Km.: Lehre für Gewölbe von veränderlicher Stärke. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 9 (1889), Nr. 51, S. 493–494.

Knothe 2004:

Knothe, Klaus: Fiedlerbriefe und Bibliographie Emil Winklers. Augsburg: Rauner 2004. (Algorismus. 48).

Köhler 1908:

Köhler, A.: Die Anwendung von Gelenken bei Brückenbauten. In: *Deutsche Bauzeitung* (1908), Nr. 42; 45, S. 283–288; 303, 307.

Koll 1908:

Koll, Gottfried: Brücken aus Stein. Hannover: Jänecke 1908. (Bibliothek der gesamten Technik. Bd. 97).

Kollmar 1919:

Kollmar, Alfred: Die Spannungsverteilung und Wirkungsweise von Flächenlagern, Bleigelenken, Kipplagern und Wälzgelenken. Berlin: Ernst & Sohn 1919.

Königl. Polizeipräsidium Berlin 1866:

Königl. Polizeipräsidium Berlin: Bau-Polizei-Ordnung für die Stadt Berlin; enthaltend Bau-Polizei-Ordnung vom 21. April 1853, Bekanntmachung wegen unrichtig angefertigter Zeichnungen und Situationspläne, vom 14. August 1854 ; Polizei-Verordnung vom 14. September 1855 wegen Sicherstellung der Passage bei Bauten etc. und wegen Benutzung von fliegenden und anderen Gerüsten, Polizei-Verordnungen vom 29. October 1856, vom 23. Januar 1860, vom 12. März 1860, vom 29. Januar 1861, vom 3. Februar 1864, vom 2. August 1864, vom 11. April 1865, vom 4. Mai 1865 und vom 10. Dezember 1865. Online verfügbar unter <http://resolver.staatsbibliothek-berlin.de/SBB000072F600000000>, zuletzt geprüft am 17.10.2014.

Köpcke 1869:

Köpcke, Claus: Ueber die Kompression von Körpern mit gekrümmten Oberflächen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 3 (1869), Nr. 1–13, S. 61–62.

Köpcke 1877a:

Köpcke, Claus: Die Messung von Bewegungen an Bauwerken mittels der Libelle. In: *Mittheilungen des Sächsischen Ingenieur- und Architektenvereins* (1877), S. 31–38.

Köpcke 1877b:

Köpcke, Claus: Die Messung von Bewegungen an Bauwerken mittels der Libelle. In: *Der Civilingenieur* Jg. 23 (1877), S. 381–392.

Köpcke 1888:

Köpcke, Claus: Über die Verwendung von drei Gelenken in Steingewölben. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 34 (1888), S. 373–380.

Köpcke 1889:

Köpcke, Claus: Ueber Steinbauten unter Eisenbahngeleisen. In: *Der Civilingenieur* Jg. 35 (1889), S. 269–280.

Köpcke 1896:

Köpcke, Claus: Gewölbte Brücken mit 3 Gelenken. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 42 (1896), S. 257–260.

Kopka 1871:

Kopka: Die mechanische Mörtel- und Beton-Bereitung. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 15 (1871), Nr. 7; 8; 9; 10, S. 97–100; 116–117; 131–135; 145–149.

Körte 1837:

Körte, Franz: Das gegossene Kalkmörtelhaus. Eine neue Bauart von C. H. Rydin. In: *Möglin'sche Jahrbücher der Landwirthschaft* Jg. 2 (1837).

Krancke 1855:

Krancke: Neuere Methoden zum Ausrüsten großer Gewölbe. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 1 (1855), S. 247–250.

Krause 1851:

Krause, Friedrich: Anleitung zur Kalk-Sand-Bau-Kunst oder zur Errichtung von Bauwerken aus gestampftem Mörtel mit verhältnismäßig weit geringeren Kosten gegen die bisher üblich gewesene Bauart, unter Beifügung einiger Entwürfe und Kostenberechnungen von Schul- und Wirthschafts-Gebäuden, um die durch diese neue Bauart zu erzielende Kostenersparniß speciell nachzuweisen. Für Landwirthe, Bauherrn und Baumeister. Glogau: C. Flemming 1851.

KARa, Sign. 1/LRA Nr. 43:

Kreisarchiv Rastatt: Rastatt Spezialia, Langenbrand. enthält: Baugesuch von E. Holtzmann & Co. vom April 1885. Signatur 1/LRA Nr. 43.

Krone 1898:

Krone, A.: Ueber die Wichtigkeit des reinen Steinbaus mit Bezug auf gewölbte Brücken. Abschrift eines Vortrages, gehalten im Dezember 1898. In: *StadtAHOL*, E.4 Nr. 3 (1898).

Krone 1899:

Krone, A.: Einige Gedanken über den Bau gewölbter Brücken. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 45 (1899), S. 263–280.

Krone 1901:

Krone, A.: Zum Wettbewerb um den Entwurf einer 2. festen Strassenbrücke über den Neckar bei Mannheim. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 35 (1901), Nr. 54, S. 339–340.

Krone, Ebhardt 1898:

Krone; Ebhardt, Bodo: Entwurf für eine gewölbte Strassenbrücke über den Rhein bei Worms. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 63 (1898), S. 19–24.

Krüger 1905:

Krüger, Richard: Leitfaden des Brückenbaues. Für den Unterricht an technischen Lehranstalten und zum praktischen Gebrauche für Bauingenieure, Bahnmeister, Tiefbautechniker usw. sowie zum Selbststudium. Leipzig: J. J. Weber 1905.

Ks. 1914:

Ks.: Wärmebeobachtungen in Gewölben. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 34 (1914), Nr. 45, S. 336.

Kutschera 1870:

Kutschera, Thomas: Ueber hydraulische Kalke und Cemente und speziell deren Natur und Vorkommen in Galizien. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 35 (1870), S. 298–312.

L. 1895:

L.: Erprobungen von Gewölben in Oesterreich. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 15 (1895), Nr. 46, S. 477–479.

L. (Liebold) 1904:

L. (Liebold, Bernhard): Eisenbahnbrücke in Stampfbeton über die Iller bei Lautrach (Bayr. Schwaben). In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 38 (1904), Nr. 71; 73, S. 441–443; 453–454.

La Faye 1777:

La Faye, Polycarpe de: Recherches sur la préparation que les Romains donnoient à la chaux. Paris: Imprimerie Royale 1777.

La Rivière 1891:

La Rivière, Gaston Jean: Constructions récentes, en Allemagne, de ponts en maçonnerie avec articulations à la clef et au joint de rupture. In: *Annales des ponts et chaussées* (1891 1er semestre), S. 899–940.

Lacombe, Panckoucke 1785:

Lacombe, Jacques; Panckoucke, Charles-Joseph (Hg.): Encyclopédie méthodique. Arts et métiers mécaniques. Paris, Liège: Panckoucke, Plomteux 1785. (Encyclopédie méthodique. Bd. 4 von 8 Bänden).

Lagrené 1852:

Lagrené, Henri-Melchior de: No. 35: Notice sur les Décintrements. In: *Annales des ponts et chaussées* (1852 2e semestre), S. 245–253.

Lagrené 1868:

Lagrené, Henri-Melchior de: N° 191: Note sur l'arche d'essai des carrières de Souppes. In: *Annales des ponts et chaussées* (1868 2e semestre), S. 130–146.

Lamandé 1814:

Lamandé, Mandé-Corneille: Pont de l'École militaire. Construit sur la Seine, à Paris, en face du Champ-de-Mars. Rouen: Periaux 1814.

Lamandé 1815:

Lamandé, Mandé-Corneille: Pont en Pierre à construire sur la Seine, à Rouen. Paris: Gœury 1815.

Landratsamt Unterallgäu 2013:

Landratsamt Unterallgäu: Alte Bahnbrücke: Vollsanierung bei langfristiger Nutzung empfohlen Landratsamt Unterallgäu. Online verfügbar unter http://www.landratsamt-unterallgaeu.de/index.php?id=44&tx_ttnews%5Bcat%5D=7&tx_ttnews%5Btt_news%5D=1830&cHash=534916185df864d606d64cf6ead59ebc, zuletzt aktualisiert am 15.11.2013, zuletzt geprüft am 19.05.2014.

Landsberg 1881:

Landsberg, Theodor: Die Concurrenz zur Erlangung von Entwürfen für eine feste Strassenbrücke über den Rhein bei Mainz. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 50 (1881), Nr. 6; 7; 8; 9; 10, S. 46–47; 61–62; 68–70; 76–78; 81–83.

Landsberg 1899:

Landsberg, Theodor (Hg.): Der Brückenbau. Die Brücken im allgemeinen. Steinerne und hölzerne Brücken. Wasserleitungs- und Kanalbrücken. Kunstformen des Brückenbaues. Unter Mitarbeit von Reinhard Baumeister, Friedrich Heinzerling, Theodor Landsberg, Friedrich Lorey, Georg Mehrstens und Gustav Tolkmitt. 3. vermehrte Auflage. Leipzig: Engelmann 1899. (Handbuch der Ingenieurwissenschaften in fünf Bänden. Teil 2).

Landsberg 1901:

Landsberg, Theodor: Der Wettbewerb um den Entwurf einer festen Strassenbrücke über den Neckar bei Mannheim. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 21 (1901), Nr. 43; 45; 47; 49; 50; 54, S. 265–268; 277–280; 293–295; 306–308; 311–312; 333–336.

Landsberg 1904:

Landsberg, Theodor (Hg.): Der Brückenbau. Die Brücken im allgemeinen. Steinerne Brücken. Ausführung und Unterhaltung der steinernen Brücken. Unter Mitarbeit von M. Förster, Theodor Landsberg und Georg Mehrstens. 4. vermehrte Auflage. Leipzig: Engelmann 1904. (Handbuch der Ingenieurwissenschaften. Teil 2).

Lange 1881:

Lange, Walther: Zur Frage der Verbesserung des Zementmörtels durch Luftkalkzuschläge. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 56, S. 321.

Lebrun 1835:

Lebrun, François Martin: Méthode pratique pour l'emploi du béton en remplacement de toute autre espèce de maçonneries dans les constructions en général. Paris: Carilian-Gœury 1835.

Lebrun 1837:

Lebrun, François Martin: Der Steinmörtel oder praktische Anweisung den Steinmörtel bei Gebäuden im Allgemeinen, besonders aber bei Bauten an und unter dem Wasser, bei Gewölben etc. statt jeder andern Art von Maurerarbeit mit Vortheil zu benützen. Aus dem Französischen. Ulm: Nübling 1837.

Lebrun 1841:

Lebrun, François Martin: Construction d'un pont monolithe en béton. In: *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* Jg. 40 (1841), S. 207–208.

Lebrun 1842:

Lebrun, François Martin: Description du pont en béton construit á Grisoles, département de Tarn-et-Garonne. In: *Bulletin de la Société d'Encouragement pour l'Industrie Nationale* Jg. 41 (1842), S. 286–289.

Lebrun 1843:

Lebrun, François Martin: Traité pratique de l'art de batir en béton, ou résumé des connaissances actuelles sur la nature et les propriétés des mortiers hydrauliques et bétons; et exposition des procédés a suivre pour employer cette espee de maçonnerie, en remplacement de toute autre, dans les travaux publique et dans les constructions particulières. Paris: Carilian-Gœury et Dalmont 1843.

Lebrun 1844:

Lebrun, François Martin: Practische Abhandlung über die Kunst, mit Beton zu bauen. Unter Mitarbeit von August L. Crelle. Berlin 1844.

Lebrun, Crelle 1843:

Lebrun, François Martin; Crelle, August L.: Practische Abhandlung über die Kunst mit Béton zu bauen. In: *Journal für die Baukunst* Jg. 19 (1843), Nr. 2; 3; 4, S. 135–186; 195–253; 287–346.

Lehmann 1872:

Lehmann: Bericht über einen Versuch mit Konkretbau. In: *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbfleisses in Preussen* Jg. 51 (1872), S. 37–38.

Lehmann 1880:

Lehmann, O.: Zur Frage der Festigkeits-Erhöhung von Portland-Zement-Mörtel durch Zusätze. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 14 (1880), Nr. 93, S. 500–501.

Leibbrand 1883:

Leibbrand, Karl von: Steinbrücke über die Nagold bei Teinach (Württemberg). In: *Zeitschrift für Baukunde* Jg. 42 (1883), S. 348–356.

Leibbrand 1888:

Leibbrand, Karl von: Steinbrücken mit gelenkartigen Einlagen. Mit Zeichnungen auf Blatt 38 bis 40 im Atlas. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 38 (1888), S. 235–260.

Leibbrand 1894:

Leibbrand, Karl von: Betonbrücke über die Donau bei Munderkingen. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 44 (1894), S. 541–558.

Leibbrand o. J. (1894):

Leibbrand, Karl von: Steinbrücken von grosser Spannweite mit gelenkartigen Einlagen ausgeführt von der K. Ministerial-Abteilung für Strassen- und Wasserbau. 1885–1891. Stuttgart: Strecker & Moser o. J. (1894).

Leibbrand 1897a:

Leibbrand, Karl von: Betonbrücke über den Neckar zwischen Kirchheim und Gemmrigheim. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 43 (1897), S. 439–444.

Leibbrand 1897b:

Leibbrand, Karl von: Gewölbte Brücken. Leipzig: Engelmann 1897. (Fortschritte der Ingenieurwissenschaften 2. Gruppe. Heft 7).

Leibbrand 1895/96:

Leibbrand, Max: Beton-Brücke mit offenen Gelenken über die Donau bei Inzigkofen. Vortrag des Landes-Baurats Leibbrand in Sigmaringen, gehalten am 30. November 1895. In: *Monatsschrift des württembergischen Vereins für Baukunde* (1895/96), S. 65–70; 73–78.

Leibbrand 1896:

Leibbrand, Max: Donaubrücke bei Inzigkofen in Hohenzollern. Betonbrücke mit offenen Gelenken. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 46 (1896), S. 279–292.

Leibbrand 1898:

Leibbrand, Max: Betonbrücke mit Granitgelenken über die Eyach bei Imnau in Hohenzollern. Mitgeteilt vom Ober-Ingenieur Alfred Gaedertz. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 48 (1898), S. 187–206.

Leibbrand 1903:

Leibbrand, Max: Die Neckarbrücke bei Neckarhausen (Hohenzollern). In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 53 (1903), S. 455–476.

Leibbrand 1906a:

Leibbrand, Max: Fortschritte im Bau weitgespannter massiver Brücken. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 40 (1906), Nr. 86; 88; 90; 94, S. 588–589; 595–600; 611–613; 639–640.

Leibbrand 1906b:

Leibbrand, Max: Fortschritte im Bau weitgespannter, flacher, massiver Brücken. In: *Beton und Eisen* Jg. 5 (1906), Nr. 10; 11, S. 249–252; 278–281.

Leibbrand 1906c:

Leibbrand, Max: Fortschritte im Bau weitgesprengter flacher massiver Brücken. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 26 (1906), Nr. 72; 73; 76, S. 455–458; 462–465; 483–486.

Les Amis du Vieux Neuville o. J.:

Les Amis du Vieux Neuville: Les Quais de la Saône. Online verfügbar unter <http://www.mairie-neuvellesursaone.fr/upload/file/wiki/Les-quais-de-Saone.pdf>, zuletzt geprüft am 12.05.2014.

Ley 2011:

Ley, Jens: Analyse des Tragverhaltens eines unbewehrten Betonbauwerks. Masterarbeit

(unveröffentlicht), Institut für Mathematik und Bauinformatik, Universität der Bundeswehr, München, 30.06.2011.

Liebold 1875:

Liebold, Bernhard: Der Zement in seiner Verwendung im Hochbau und der Bau mit Zement-Béton zur Herstellung feuersicherer, gesunder und billiger Gebäude aller Art. Nach eigenen und fremden Erfahrungen bearbeitet. Halle a.d.S: G. Knapp's Verlagsbuchhandlung 1875.

Liebold 1877a:

Liebold, Bernhard: Brücken aus Zementbeton. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 11 (1877), Nr. 53, S. 259.

Liebold 1877b:

Liebold, Bernhard: Gewölbte Probetreppe von Kalkbruchsteinen und Cementmörtel. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 9 (1877), S. 777-778.

Liebold 1877c:

Liebold, Bernhard: Practische Mittheilungen über die Verwendung der Zemente. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 21 (1877), Nr. 1; 2; 3; 4, S. 7-8; 27-28; 45-47; 57-59.

Liebold 1877d:

Liebold, Bernhard: Wohnhaus aus Grobmörtel-Mauerwerk. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 11 (1877), Nr. 92, S. 458-459.

Liebold 1878a:

Liebold, Bernhard: Brückenbau aus Grobmörtel (Zement-Beton). In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 12 (1878), S. 310.

Liebold 1878b:

Liebold, Bernhard: Die schiefe Brücke in Glesse. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 12 (1878), Nr. 89, S. 453.

Liebold 1880:

Liebold, Bernhard: Gutachten über Béton-Bauten im Hochbau. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 24 (1880), Nr. 1-6; 8-9, S. 3-4; 21-24; 36-39; 53-56; 74-76; 91-93; 105-107; 118-120.

Liebold 1882:

Liebold, Bernhard: Die neuen Bruchsteinbrücken und Kanäle der Vorwohler Portland-Zementfabrik von Prüssing, Planck & Co. in Holzminden. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 26 (1882), Nr. 2-7, S. 9-12; 17-19; 25-26; 33-35; 41-43; 51-53.

Liebold 1883:

Liebold, Bernhard: Brücken aus Bruchstein-Cementmörtel-Mauerwerk. In: *Wochenblatt für Architekten und Ingenieure* Jg. 5 (1883), Nr. 79, S. 401.

Liebold o. J. (ca. 1892):

Liebold, Bernhard: Ausgeführte Durchlässe und Brücken. Durchlässe und Brücken aus Cement-Bruchstein-Mauerwerk mit besonderer Berücksichtigung von Strassen und Eisenbahnen im Gebirge. Braunschweig: August Wehrt Kunstdruckerei o. J. (ca. 1892).

Liebold 1992/93:

Liebold, Max: Beitrag zur Geschichte der Firma Liebold & Co. AG Holzminden und der Firma Habermann & Guckes – Liebold AG. In: *Jahrbuch für den Landkreis Holzminden* Jg. 10/11 (1992/93), S. 50–67.

Löhr 1879:

Löhr, B.: Ueber Belastungsproben von Gewölbbögen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 71 (1879), S. 358–361.

Lorenz 1990:

Lorenz, Werner: Die Entwicklung des Dreigelenksystems im 19. Jahrhundert. In: *Stahlbau* Jg. 59 (1990), Nr. 1, S. 1–10.

Loriot 1774:

Loriot, Antoine-Joseph: Mémoire sur une découverte dans l'art der bâtir. Paris: Michel Lambert 1774.

Lucks 1976:

Lucks, Kai: Die Münchner Isarbrücken im 19. und frühen 20. Jahrhundert. Dissertation, Fachbereich für Architektur, Technische Universität, München, 09.07.1976.

Magens 1897:

Magens: Ueber ausgeführte Betonbauten. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 31 (1897), Nr. 7; 8, S. 40–42; 45–46.

Mahiels 1893:

Mahiels, Armand: Le béton et son emploi. Matériaux – Chantiers – Coffrages – Prix de Revient – Applications. Liège: Bénard 1893. (Constructions civiles, maritimes et militaires.

Maillart 1925:

Maillart, Robert: Die Brücke in Villeneuve-sur-Lot, nebst Betrachtungen zum Gewölbebau. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 85 (1925), Nr. 12; 13, S. 151–154; 169–170.

Mallet 1828:

Mallet, Charles-François: Rapport (...) sur le ciment découvert par M. Lacordaire. In: *Journal du génie civil* Jg. 6 (1828), S. 575–606.

Mallet 1829:

Mallet, Charles-François: Rapport (...) sur le ciment découvert par M. Lacordaire. In: *Bulletin de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale* Jg. 28 (1829), S. 317–337.

Mallet 1831:

Mallet, Charles-François: Über den Cement von Pouilly und andere Cemente. In: *Journal für die Baukunst* Jg. 4 (1831), S. 52–80.

Marrey 1990:

Marrey, Bernard: Les ponts modernes. 18e–19e siècles. [Paris]: Picard 1990.

Marrey 1995:

Marrey, Bernard: Les ponts modernes. 20e siècle. [Paris]: Picard 1995.

Martin, Krautzberger 2010:

Martin, Dieter J.; Krautzberger, Michael: Handbuch Denkmalschutz und Denkmalpflege –

einschließlich Archäologie. Recht – fachliche Grundsätze – Verfahren – Finanzierung. 3. überarb. und wes. erw. Aufl. München: Beck 2010. Online verfügbar unter [http://opac.unibw.de/InfoGuideClient.ubysis/start.do?Login=iguby&Query=540="978-3-406-60924-4"](http://opac.unibw.de/InfoGuideClient.ubysis/start.do?Login=iguby&Query=540=).

Marx, Schacht 2010a:

Marx, Steffen; Schacht, Gregor: Betongelenke im Brückenbau. Bericht zum DBV-Forschungsvorhaben 279. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V. 2010. (DBV-Heft. 18).

Marx, Schacht 2010b:

Marx, Steffen; Schacht, Gregor: Gelenke im Massivbau. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Jg. 105 (2010), Nr. 1, S. 27–35.

Mehr 1899:

Mehr, P.: Die neue Muldenbrücke zwischen Niederschlema und Stein-Hartenstein. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 45 (1899), S. 361–366.

Mehrtens 1873:

Mehrtens, Georg: Ueber Methoden zur Ausrüstung größerer Brückengewölbe. Mit Benutzung deutscher, englischer und französischer Quellen. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 19 (1873), S. 492–508.

Mehrtens 1885:

Mehrtens, Georg: Fortschritte im Bau von Brückengewölben. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 5 (1885), Nr. 47; 48; 50, S. 473–475; 490–492; 517–519.

Mehrtens 1898:

Mehrtens, Georg: Der Brückenbau sonst und jetzt. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 32 (1898), Nr. 10–13; 15; 16, S. 71–77; 79–82; 86–91; 95–97; 109–115; 117–122.

Mehrtens 1900:

Mehrtens, Georg: Der deutsche Brückenbau im XIX. Jahrhundert. In: *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure* Jg. 44 (1900), Nr. 16–20; 22; 25; 28; 30; 34; 40; 45; 46, S. 495–503; 531–539; 570–580; 631–637; 691–700; 803–810; 911–917; 982–989; 1118–1128; 1337–1345; 1536–1545; 1561–1568.

Mehrtens 1908:

Mehrtens, Georg: Vorlesungen über Ingenieur-Wissenschaften. Zweiter Teil Eisenbrückenbau. Leipzig: Engelmann 1908.

Mehrtens 1984:

Mehrtens, Georg: Der deutsche Brückenbau im XIX. Jahrhundert. Denkschrift bei Gelegenheit der Weltausstellung des Jahres 1900 in Paris. Berlin: Springer 1900; Reprint: Düsseldorf: VDI-Verlag 1984.

Meinel 1948:

Meinel, Kurt: Die Ebertbrücke über das Syratal in Plauen. In: *Bauplanung und Bautechnik* Jg. 2 (1948), Nr. 8, S. 223–231.

Melan 1890a:

Melan, Joseph: Die Viaducte der Eisenbahnlinie Tabor–Pisek. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 10 (1890), Nr. 8–10, S. 76–77; 85–87; 102–103.

Melan 1890b:

Melan, Joseph: Versuche mit Gewölben aus verschiedenen Baustoffen. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 10 (1890), Nr. 44, S. 449–450.

Melan 1903–04:

Melan, Joseph: Vorlesungen über Brückenbau (Steinkonstruktion). Gehalten vom Herrn dipl. Ing. Prof. Melan an der k. k. deutschen technischen Hochschule in Prag, Studienjahr 1903–04. o. O.: o. V. als Manuskript gedruckt 1903–04.

Melan 1911:

Melan, Joseph: Steinerne Brücken und Brücken aus Beton und Eisen. Leipzig: Deuticke 1911. (Der Brückenbau. Nach Vorträgen gehalten an der deutschen technischen Hochschule in Prag. Bd. 2 von 4 Bänden).

Mesnager 1896:

Mesnager, Augustin Charles: Étude d'une disposition d'assemblage destiné à réduire à une valeur négligeable les efforts secondaires qui se produisent dans les treillis à attaches rigides. In: *Annales des ponts et chaussées* (1896 2me semestre), S. 750–783.

Mesnager 1907:

Mesnager, Augustin Charles: Expériences sur une semi-articulation pour voûtes en béton armé. In: *Annales des ponts et chaussées* (1907 2e semestre), S. 180–200.

Mesnager 1910a:

Mesnager, Augustin Charles: Couverture d'une partie du canal Saint-Martin, à Paris, par une voûte en béton armé. In: *Le Génie Civil* Jg. 30 (1910), Nr. 57, No. 13; 14, S. 241–246; 259–264.

Mesnager 1910b:

Mesnager, Augustin Charles: Pont en béton armé, à trois articulations, d'Amélie-les-Bains (Pyrénées-Orientale), et applications du même système de semi-articulations. In: *Le Génie Civil* Jg. 30 (1910), Nr. 57, No. 17, S. 313–316.

Mesnager 1921:

Mesnager, Augustin Charles: Cours de béton armé. Paris: Dunod 1921.

Metropole Ruhr:

Metropole Ruhr: Karl-Lehr-Brücke. Online verfügbar unter <http://www.route-industriekultur.de/themenrouten/01-duisburg-stadt-und-hafen/karl-lehr-bruecke.html>, zuletzt geprüft am 06.03.2015.

Michaëlis 1869:

Michaëlis, Wilhelm: Die hydraulischen Mörtel, insbesondere der Portland-Cement in chemisch-technischer Beziehung. Leipzig: Quandt & Händel 1869.

Michaëlis 1876:

Michaëlis, Wilhelm: Zur Werthstellung des Zements. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 10 (1876), Nr. 23; 101, S. 114–116; 505–507.

Mihálik 1858:

Mihálik, Johann von: Praktische Anleitung zum Béton-Bau für alle Zweige des Bauwesens. Nach eigenen Versuchen und Erfahrungen. Wien: Josef Stöckholzer von Hirschfeld 1858.

Morandière 1891:

Morandière, Romain: Traité de la construction des Ponts et Viaducs en Pierre, en Charpente et en Métal pour Routes, Canaux et Chemins de Fer avec un Appendice pour la Construction des Souterrains. 2 Bände. Paris: Dunod 1891.

Mörsch 1900:

Mörsch, Emil: Nebenspannung in Brückengewölben mit drei Gelenken. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 46 (1900), S. 193–202.

Mörsch 1904:

Mörsch, Emil: Die Isarbrücke bei Grünwald. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 44 (1904), Nr. 23; 24, S. 263–267; 279–283.

Mörsch 1905:

Mörsch, Emil: Die Rekonstruktion der Maximiliansbrücke in München. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 45 (1905), Nr. 19, S. 236–239.

Mörsch 1924:

Mörsch, Emil: Ueber die Berechnung der Gelenkquader. In: *Beton und Eisen* Jg. 23 (1924), Nr. 12, S. 156–161.

Mörsch 1968:

Mörsch, Emil: Herstellung und bauliche Einzelheiten. Unter Mitarbeit von Hermann Bay und Karl Deininger. 6. Aufl. Stuttgart: Konrad Wittwer 1968. (Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton. 2. Bd. von 2 Bänden).

Moser 1901:

Moser, K.: Grosse Steinbrücken im Grossherzogtum Baden. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 38 (1901), Nr. 25, S. 271–275.

München / Stadtbauamt o. J.:

München / Stadtbauamt (Hg.): Muenchener Städtische Baukunst. Aus den letzten Jahrzehnten. München: Callwey o. J.

n. 1881:

n.: Württembergische Landes-Gewerbe-Ausstellung, Stuttgart 1881. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 51; 52, S. 296–298; 301–302.

N. N. 1831:

N. N.: Notice sur le ciment romain de Pouilly. In: *Journal des connaissances usuelles et pratiques* Jg. 13 (1831), S. 31–34.

N. N. 1832:

N. N.: Notice sur le ciment romain de Pouilly. In: *Journal des connaissances usuelles et pratiques* Jg. 8 (1832), Nr. 15, S. 182–186.

ANHANG

N. N. 1840:

N. N.: Pont monolithe en béton. In: *Revue encyclopedique des connaissances humaines, partie des sciences* Jg. 10 (1840), S. 477–478.

N. N. 1842:

N. N.: Ueber das von Rüdin in Schweden erfundene Giessen der Häuser aus Kalkmörtel. In: *Polytechnisches Centralblatt* Jg. 8 (1842), Nr. 60, S. 945–951.

N. N. 1852:

N. N.: Der Cement von Vassy und die mit demselben ausgeführten Bauwerke, besonders Pont aux doubles zu Paris. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 17 (1852), S. 66–74.

N. N. 1856:

N. N.: Appareil pour le décintrement du grand pont de la Marne de Nogent-sur-Marne. In: *Annales des ponts et chaussées* (1856 2e semestre), S. 311–315.

N. N. 1862:

N. N.: Ausrüstung der Gewölbe. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 27 (1862), S. 73–75.

N. N. 1863:

N. N.: Bauten aus agglomeriertem Beton. In: *Allgemeine Bauzeitung, Notizblatt* Jg. 28 (1863), S. 239–242.

N. N. 1865a:

N. N.: Hydroplastischer Stein, von Lebrun. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 30 (1865), S. 409–411.

N. N. 1865b:

N. N.: Der agglomerierte Beton nach dem Verfahren des Hrn. Coignet in Paris. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 30 (1865), S. 1–4.

N. N. 1867:

N. N.: Die Wasserversorgung der Stadt Paris. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 19 (1867), S. 179–184.

N. N. 1868a:

N. N.: Bahnwärterhäuser aus Gußmauerwerk. In: *Polytechnisches Journal* Jg. 187 (1868), S. 517.

N. N. 1868b:

N. N.: Mittheilungen aus Vereinen. Verein für Baukunde zu Stuttgart. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 2 (1868), Nr. 26, S. 269–270.

N. N. 1868c:

N. N.: Vortrag von E. H. Hoffmann "Ueber gewölbte Brücken" in: Die XV. Versammlung deutscher Architekten und Ingenieure in Hamburg. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 2 (1868), Nr. 42, S. 443.

N. N. 1870:

N. N.: Mittheilungen aus Vereinen. Verein für Baukunde in Stuttgart. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 4 (1870), Nr. 7, S. 60–61.

N. N. 1872:

N. N.: Der Cementbau. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 16 (1872), Nr. 24, S. 187–188.

N. N. 1873:

N. N.: Ueber die Anwendung des Beton zur Herstellung von Wohnhäusern. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 17 (1873), Nr. 2, S. 28–31.

N. N. 1875:

N. N.: Bericht der Handelskammer zu Braunschweig. Für das Jahr 1874. Braunschweig: Hof-Buchdruckerei von Julius Krampe 1875.

N. N. 1877a:

N. N.: Beschlüsse des Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Zement, betr. Normen über Verkauf, Beschaffenheit und Prüfung von Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 11 (1877), Nr. 9, S. 39.

N. N. 1877b:

N. N.: Einheitliche Normen für den Handel, die Fabrikation und Prüfung von Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 11 (1877), Nr. 10; 26, S. 43–44; 124–125.

N. N. 1878:

N. N.: Einwölbung einer Brücke ohne Herstellung eines Lehrgerüsts. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 10 (1878), S. 418.

N. N. 1879:

N. N.: Angelegenheiten des Vereins. Wochen-Versammlung am 26. März 1879. Vortrag des Herrn Architekten Brockmann über Grobmörtel-Mauerwerk. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 25 (1879), S. 344–348.

N. N. 1880a:

N. N.: Cement und Cementwaaren (Gruppe XVIII). In: *Beilage zur Düsseldorfer Ausstellungs-Zeitung* (1880), Nr. 18, S. o. S.

N. N. 1880b:

N. N.: Festigkeitszahlen von Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 14 (1880), Nr. 7, S. 40.

N. N. 1880c:

N. N.: Officieller Katalog der Gewerbe-Ausstellung in Düsseldorf 1880. 2. Aufl. Düsseldorf: Im Selbstverlag des Vorstandes 1880.

N. N. 1881a:

N. N.: Mittheilungen aus Vereinen. Architekten- und Ingenieurverein zu Aachen. Versammlung am 28. Februar 1881. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), Nr. 30, S. 178–179.

N. N. 1881b:

N. N.: Mittheilungen aus Vereinen. Architekten- und Ingenieurverein zu Cassel. Versammlung am 29. März 1881. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 15 (1881), S. 207–208.

N. N. 1882:

N. N.: Portland-Zement mit Zusatz von Hohofen-Schlacken. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 16 (1882), Nr. 83, S. 490.

ANHANG

N. N. 1883a:

N. N.: In der Frage der Verfälschung von Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 17 (1883), Nr. 1 u. 2, S. 11.

N. N. 1883b:

N. N.: Ueber den Einfluss der verschiedenen Korngrößen eines zu Zement-Normenproben benutzten Sandes auf die Bindefähigkeit der Mörtel. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 17 (1883), Nr. 58, S. 346–347.

N. N. 1884a:

N. N.: Abänderung der Normen für die einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 18 (1884), Nr. 54, S. 323.

N. N. 1884b:

N. N.: Die Herstellung einer Betonbrücke von 12 Meter Spannweite in einem Tage. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 4 (1884), Nr. 22, S. 135–136.

N. N. 1885:

N. N.: Mittheilungen aus Vereinen. Architekten- und Ingenieurverein in Aachen. Versammlung am 28. Oktober 1885. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 19 (1885), Nr. 97, S. 587–588.

N. N. 1885b:

N. N.: Aus den Verhandlungen der General-Versammlung des Vereins deutscher Zement-Fabrikanten 1885. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 19 (1885), Nr. 25; 27; 29, S. 155–156; 167–168; 178–179.

N. N. 1886a:

N. N.: Betonbrücke auf der Ausstellung in Augsburg. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 55, S. 331.

N. N. 1886b:

N. N.: Treibender Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 19, S. 116.

N. N. 1887a:

N. N.: Normen für einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Cement. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 7 (1887), Nr. 33, S. 309–311.

N. N. 1887b:

N. N.: Normen für einheitliche Lieferung und Prüfung von Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 21 (1887), Nr. 67, S. 400–403.

N. N. 1889:

N. N.: Bestimmungen für die einheitliche Lieferung und Prüfung von Portlandzement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 23 (1889), Nr. 85; 86, S. 515–517; 519–521.

N. N. 1892:

N. N.: Neuere Ausführungen im Stampfbetonbau. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 26 (1892), Nr. 81; 83; 84, S. 496–498; 509; 513.

N. N. 1894a:

N. N.: Concrete Bridge at the Antwerp Exhibition. In: *The Engineer* (1894), S. 520.

N. N. 1894b:

N. N.: Der Bau der Munderkinger Donaubrücke. In: *Baugewerks-Zeitung* Jg. 26 (1894), S. 1065–1066.

N. N. 1894c:

N. N.: Pont en béton sur le Danube à Munderkingen (Autriche). In: *Le Génie Civil* Jg. 15 (1894), Nr. 26, No. 7, S. 104–105.

N. N. 1899a:

N. N.: Brückenbauten aus Stein oder Eisen. In: *Süddeutsche Bauzeitung* Jg. 9 (1899), Nr. 47; 48; 49, S. 369–374; 380–381; 386–387.

N. N. 1899b:

N. N.: Erinnerung an Ehingen a. d. Donau. Cementbrücken mit Bogengelenken in Württemberg und Hohenzollern. Den Teilnehmern an dem Sommerausflug des Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaren, Kalk und Cement gewidmet von dem Stuttgarter Immobilien- und Bau-Geschäft Aktiengesellschaft in Stuttgart mit seiner Filiale der Stuttgarter Cementfabrik in Blaubeuren und Allmendingen und seinem Tochterunternehmen den Oberschwäbischen Cementwerken Aktiengesellschaft sowie der mit diesen Fabriken in Betriebsgemeinschaft stehenden Firma Gebrüder Leube in Ulm. Stuttgart: Strecker & Moser 1899.

N. N. 1899c:

N. N.: Was versteht man im allgemeinen unter Beton? In: *Süddeutsche Bauzeitung* Jg. 9 (1899), Nr. 32, S. 256.

N. N. 1900:

N. N.: Gelenke in Betonbrücken. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 35 (1900), Nr. 8, S. 79–80.

N. N. 1901a:

N. N.: Brückengründung auf kiesigem Untergrund mit Zement-Einpressung. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 35 (1901), Nr. 74, S. 455–456.

N. N. 1901b:

N. N.: Prinzregenten-Brücke im allerhöchsten Auftr. Sr. Königl. Hoheit d. Prinzregenten Luitpold von Bayern entworfen u. erbaut von d. Bauunternehmung Sager & Woerner, Aschaffenburg, München, 1900–1901. München: o. V. 1901.

N. N. 1903:

N. N.: Zur Unterscheidung des Portlandzementes von anderen Zementen, die unter ähnlich lautenden Namen gehen. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 37 (1903), Nr. 46, S. 296.

N. N. 1904a:

N. N.: Das Lehrgerüst der Syratalbrücke in Plauen i. V. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 38 (1904), Nr. 66, S. 414.

N. N. 1904b:

N. N.: Die Maximiliansbrücke in München. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 44 (1904), Nr. 24, S. 285.

ANHANG

N. N. 1904c:

N. N.: Die neuen Linien der Rhätischen Bahn. Die gewölbten Brücken der Albulabahn. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 43/44 (1904), Nr. 3; 4; 5, S. 29–32; 41–49; 60–62.

N. N. 1904d:

N. N.: Zur Senkung der Maximilians-Brücke in München. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 38 (1904), Nr. 67, S. 423–424.

N. N. 1904e:

N. N.: Die Eröffnung der Lokalbahn Memmingen–Legau. In: *Memminger Zeitung* Jg. 41, Nr. 141, 21.06.1904, S. 1.

N. N. 1904f:

N. N.: Die Münchener Maximiliansbrücke und die Lautracherbrücke. In: *Memminger Zeitung* Jg. 41, Nr. 150, 01.07.1904, S. 2.

N. N. 1904g:

N. N.: Die gefährdete Maximiliansbrücke. In: *Allgäuer Zeitung*, 07.07.1904, Nr. 149, S. 2–3.

N. N. 1905:

N. N.: Mit der Eröffnung der Wittelsbacher-Brücke in München. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 39 (1905), Nr. 79, S. 478–479.

N. N. 1909:

N. N.: Der Entwurf einer gewölbten Brücke über den Rockeyfluß bei Cleveland. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 29 (1909), Nr. 37, S. 256.

N. N. 1925:

N. N.: La reconstruction du viaduc de Grandfey. In: *Bulletin technique de la Suisse romande* Jg. 51 (1925), Nr. 25, S. 303–307.

N. N. 2007:

N. N.: Über Claus Köpcke. Online verfügbar unter <http://www.ssb-sachsen.de/ck.htm>, zuletzt geprüft am 17.04.2014.

Nakonz 1913:

Nakonz, Walter: Schiefe Dreigelenkbogenbrücken aus Eisenbeton. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 63 (1913), S. 635–644.

Nakonz 1920:

Nakonz, Walter: Die statische Berechnung schiefer Dreigelenkgewölbe. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 70 (1920), S. 357–384.

Navier 1833:

Navier, Claude Louis Marie Henri: Notice sur M. Bruyère. In: *Annales des ponts et chaussées* (1833 2me semestre), S. 382–403.

Nègre 2006:

Nègre, Valérie: L'ornement en série. Architecture, terre cuite et carton-pierre. Sprimont: Mardaga 2006.

Nollet 1753:

Nollet, Jean-Antoine: Expériences et observations faites en differens endroits de l'Italie. Année M.DCCXLIX. In: *Histoire de l'Académie royale des Sciences* (1753), S. 444–488.

Oppermann 1873:

Oppermann, Charles Alfred: Aqueduc des Eaux de la Vanne à Moret. In: *Nouvelles annales de la construction* Jg. 19 (1873), Nr. 1, S. 11–12.

Örley 1910:

Örley, Leopold: Erfahrungen und Beobachtungen beim Bau der 85 m weiten Wölbbrücke über den Isonzo bei Salcano. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 62 (1910), Nr. 33; 34, S. 529–532; 541–546.

Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein 1895:

Österreichischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Bericht des Gewölbe-Ausschusses. Sonderabdruck aus der Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines. Wien: Eigenverlag des Vereins 1895.

P.K. 1883:

P.K.: Mittheilungen aus Vereinen. Achitekten- und Ingenieurverein zu Hamburg. Versammlung am 26. Januar 1883. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 17 (1883), S. 86.

Pappit 1909:

Pappit: In Beton gewölbte Eisenbahnbrücken über die Saale bei Großheringen. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. VI (1909), Nr. 11, S. 45–47.

Paris 1928:

Paris, A.: Die Brücke von La Caille. In: *Der Bauingenieur* Jg. 9 (1928), Nr. 45, S. 831–833.

Pasley 1838:

Pasley, Charles William: Observations on limes, calcareous cements, mortars, stuccos, and concrete. London: John Weale 1838.

Perronet 1777:

Perronet, Jean-Rodolphe: Mémoire sur le cintrement et le décintrement des ponts. Et sur les différens mouvemens que prennent les voûtes pendant leur construction. Année M.DCCLXXIII. In: *Histoire de l'Académie royale des Sciences* (1777), S. 33–45.

Perronet 1788:

Perronet, Jean-Rodolphe: Description des projets et de la construction des Ponts de Neuilli, de Mantes, d'Orléans, de Louis XVI, etc. Paris: Didot 1788.

Perronet 1793:

Perronet, Jean-Rodolphe: Mémoire sur la recherche des moyens que l'on pourroit employer pour construire de grandes Arches de pierre de deux cents, trois cents, quatre cents & jusqu'à cinq cents pieds d'ouverture, qui seroient destinées à franchir de profondes vallées bordées de rochers escarpés. Paris: de l'Imprimerie nationale exécutive du Louvre 1793.

Peters 1898:

Peters, Erich: Beton als Baumaterial der Zukunft. In: *Deutsche Techniker-Zeitung* Jg. 15 (1898), Nr. 41, S. 337–339.

Pevc 1895:

Pevc, Carl: Mitteilungen über die Wasserversorgung Münchens anlässlich Besichtigung der Bauarbeiten durch die städtischen Kollegien als Leitfaden zusammengestellt. München: Gerber 1895.

Pluyette 1857:

Pluyette, Charles Félix: Apparat zum Ausrüsten der Gewölbe der grossen Brücke über die Marne zu Nogent sur Marne. Auszugsweise Mittheilungen aus den "Annales des ponts et chaussées". In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 7 (1857), S. 431–433.

Polonceau 1840:

Polonceau, Antoine Rémy: Ueber Béton oder Gußmauerwerk. Aus der Revue générale de l'Architecture. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 5 (1840), S. 234–241.

Pontzen 1875:

Pontzen, Ernest: Der Varrugas-Viaduct mit einigen anderen Viaducten verglichen. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 27 (1875), Nr. 14, S. 273–282.

Prade 1989:

Prade, Marcel: Ponts et viaducs au XIXe siècle. Techniques nouvelles et grandes réalisations françaises. Paris, Poitiers: Errance; Brissaud 1989. (Collection Art et patrimoine. 5).

Prenninger 1892:

Prenninger, Carl: Bericht des Gewölbe-Ausschusses des Oesterr. Ingenieur- und Architekten-Vereines über den Stand der Arbeiten bei den Probe-Gewölben. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 44 (1892), Nr. 29, S. 415–416.

Preßprich 1910:

Preßprich, Gustav Adolph: Vom Neubau der Augustus-Brücke in Dresden. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 44 (1910), Nr. 46; 47; 50, S. 354–355; 358–359; 363–367; 383–384.

Probst 1899:

Probst, F.: Einiges über Gelenke massiver Bogenbrücken. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 45 (1899), S. 545–551.

Probst 1901:

Probst, F.: Die Steinbrücke im Wettbewerb mit der Eisenbrücke. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 35 (1901), Nr. 64, S. 399.

Probst 1902:

Probst, F.: Ein Beitrag zum Steinbrückenbau. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 36 (1902), Nr. 1/2, S. 7–10.

Prochnow 1842:

Prochnow, Johann Gottlieb: Vollständige Anleitung zur Kunst, Wohnungen und Wirtschafts-Gebäude in sehr kurzer Zeit wohlfeil, Feuer- und Wetterfest zu erbauen, aus

reinem Sande und sehr wenigem Kalk. Für Haus- und Güterbesitzer, Bauherren, Baumeister und Alle, die für sich und andere bauen wollen. Schwedt: J. C. W. Jantzen 1842.

Prochnow 1848:

Prochnow, Johann Gottlieb: Vollständige Anleitung zur Kunst, Wohnungen und Wirthschafts-Gebäude in sehr kurzer Zeit wohlfeil, Feuer- und Wetterfest zu erbauen, aus reinem Sande und sehr wenigem Kalk. Für Haus- und Güterbesitzer, Bauherren, Baumeister und Alle, die für sich und andere bauen wollen. 2. völlig umgearb. u. m. neuen Ermittlungen zu e. Estrich u. mehr dergl. vers. Ausg. Greifenhagen: Selbstverlag, Kundler 1848.

Pugin, Heath 1829:

Pugin; Heath, C.: Paris and its environs. London: Jennings 1829.

Quietmeyer 1911:

Quietmeyer, Friedrich: Zur Geschichte der Erfindung des Portlandzementes. Zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs von der Königl. Technischen Hochschule zu Hannover genehmigte Dissertation. Berlin: Verlag der Tonindustrie-Zeitung 1911.

Rabut 1916:

Rabut, Charles: Les Ponts de Montauban. In: *Le Génie Civil* Jg. 36 (1916), Nr. 5, S. 65–69.

Rädlinger 2008:

Rädlinger, Christine: Geschichte der Münchner Brücken. Brücken bauen von der Stadtgründung bis heute. München: Franz Schiermeier 2008.

Rädlinger 2012:

Rädlinger, Christine: Geschichte der Isar in München. München: Schiermeier 2012.

Reckenschuß 1903:

Reckenschuß, R. v.: Die Albulabahn. Vortrag, gehalten den 25. November 1903. online verfügbar unter: http://www.landesmuseum.at/pdf_frei_remote/SVVNWK_44_0379-0412.pdf (1903).

Reihling 1896:

Reihling, Karl: Stein- und Betonbrücken mit gelenkartigen Einlagen. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 42 (1896), S. 50–72.

Rheinhard 1886:

Rheinhard, August: Ueber Betonbauten, insbesondere Betonbrücken. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 6 (1886), Nr. 27, S. 264–266.

Rheinhard 1887:

Rheinhard, August: Über die Kunst des Wölbens. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 7 (1887), Nr. 35; 36; 37, S. 325–357; 339–341; 349–350.

Rico 2001:

Rico, Romain: François-Martin Lebrun 1799–1849. Architecte; Théoricien du béton. Masterarbeit (unveröffentlicht), Histoire de l'Art, Université de Toulouse – Le Mirail, Toulouse, 09.2001.

Röder 1821:

Röder, Georg Ludwig August: *Practische Darstellung der Brückenbaukunde nach ihrem ganzen Umfange*. Darmstadt: Heyer 1821.

Röder 1867:

Röder: *Gewölbte Brücken nach E. H. Hoffmann*. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 1 (1867), Nr. 46, S. 444.

Rödlich 1829:

Rödlich, Hieronymus Franz: *Praktische und historische Darstellung der Erd-Bau-Kunst wie solche in verschiedenen Welttheilen betrieben wird, nebst der sichern Anweisung zur Verfertigung der im Wasser unauflöslchen Mörtel-Steine und Mörtel-Mauern*. Berlin: C. H. Nortmann 1829.

Rohn 1910:

Rohn, A.: *Steinerne und eiserne Brücken*. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 56 (1910), Nr. 22, S. 289–293.

Röll 1915:

Röll, Victor von (Hg.): *Enzyklopädie des Eisenbahnwesens*. Band 7: *Kronenbreite. – Personentarife*. 2., vollst. neubearb. Aufl. Berlin [u. a.]: Urban & Schwarzenberg 1915.

Rondelet 1802:

Rondelet, Jean Baptiste: *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: Selbstverlag 1802.

Roth 2002:

Roth, Hans: *Erbe und Auftrag. Heimatschutz und Heimatpflege in Bayern im Wandel der Zeit*. In: Wolfgang Pledl (Hg.): *Heimat erleben, bewahren, neu schaffen. Kultur als Erbe und Auftrag*. 100 Jahre Bayerischer Landesverein für Heimatpflege e. V. München: Bayerischer Landesverein für Heimatpflege 2002, S. 9–108.

Rozier 1782:

Rozier, François (Hg.): *Arr–Cha*. Paris: Serpente 1782. (*Cours complet d'agriculture théorique, pratique, économique et de médecine rurale et vétérinaire ou dictionnaire universel d'agriculture*. Bd. 2 von 10 Bänden).

Rozier 1787:

Rozier, François (Hg.): *Mul–Pla*. Paris: Delalain 1787. (*Cours complet d'agriculture théorique, pratique, économique et de médecine rurale et vétérinaire ou dictionnaire universel d'agriculture*. Bd. 7 von 10 Bänden).

Rydin 1834:

Rydin, Carl Gustaf: *Gjutna Kalkbrukshus*. Stockholm: Georg Scheutz 1834.

Ržiha 1877:

Ržiha, Franz von: *Brückenbau*. Wien: k. k. Hof- und Staatsdruckerei 1877. (*Eisenbahn-Unter- und Oberbau*. Bd. 2 von 3 Bänden).

S. 1872:

S.: *Mittheilungen aus Vereinen*. Architektenverein zu Berlin. Versammlung am 16. November 1872. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 6 (1872), Nr. 47, S. 385.

S. 1902:

S.: Die neue Brücke über die Pétrusse in Luxemburg. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 39 (1902), Nr. 26, S. 281–283.

Sachs 1822:

Sachs, Salomo: Der verbesserte Pisé-Bau. Berlin: Selbstverlag 1822.

Sager & Woerner 1964:

Sager & Woerner: Sager & Woerner 1864–1964. Arbeit – Erfolg – Verluste. 1. Teil: 1864–1920. Bd. 1 von 3 Bänden. München: Selbstverlag 1964.

Saliger 1911:

Saliger, Rudolf: Die neuen Österreichischen Vorschriften für Eisenbeton. Bemerkungen hierzu. In: *Armierter Beton* Jg. 4 (1911), Nr. 10, S. 345–348.

Salus 1909:

Salus, P.: Die Bahnlinie Davos–Filisur. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 53; 54 (1909), Nr. 25; 26; 1, S. 319–324; 336–340; 3–10.

Salzmann 1865:

Salzmann, Johann: Ueber Béton-Bau insbesondere über die im k.k. Pulvererzeugungs-Etablissement zu Stein bei Laibach hergestellten Béton-Bauten. In: *Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines* Jg. 17 (1865), S. 25–27, 49–53.

Schaal 1898:

Schaal: Präsident v. Leibbrand †. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 18 (1898), Nr. 12A, S. 141–142.

Schacht, Marx 2010:

Schacht, Gregor; Marx, Steffen: Unbewehrte Betongelenke – 100 Jahre Erfahrung im Brückenbau. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Jg. 105 (2010), Nr. 9, S. 599–607.

Schaechterle 1912:

Schaechterle, Karl: Eisenbetonbrücken. Berlin [u. a.]: Göschen 1912. (Sammlung Göschen. 627).

Schaechterle 1914:

Schaechterle, Karl: Neue Bauformen und Bauausführungen in Beton und Eisenbeton bei der württembergischen Staatseisenbahn-Verwaltung. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. 11 (1914), Nr. 7; 8; 9; 11, S. 49–54; 57–61; 65–71; 81–82.

Schaechterle 1928:

Schaechterle, Karl: Über Maßnahmen zur Herabsetzung und Ausschaltung der Schwindspannungen bei Bauwerken aus Beton und Eisenbeton. In: *Bautechnik* Jg. 6 (1928), Nr. 37; 40; 43, S. 527–529; 602–606; 641–645.

Schäffer, Sonne 1880:

Schäffer, Theodor; Sonne, Eduard (Hg.): Die Brücken im Allgemeinen. Hölzerne und steinerne Brücken. Kunstformen des Brückenbaues. Unter Mitarbeit von Reinhard Baumeister, Friedrich Heinzerling, Georg Mehrstens und C. Wilcke. Leipzig: Engelmann 1880. (Handbuch der Ingenieurwissenschaften in vier Bänden. Bd. 2).

Schäffer, Sonne 1882:

Schäffer, Theodor; Sonne, Eduard (Hg.): Der Brückenbau. Zweite Abtheilung. Eiserne Brücken. Bewegliche und Aquaduct-Brücken. Unter Mitarbeit von E. Brik, W. Fränkel, Friedrich Heinzerling, W. Hinrichs, Fr Steiner und Emil Winkler. Leipzig: Engelmann 1882. (Handbuch der Ingenieurwissenschaften. 2. Bd.).

Schäffer, Sonne 1886:

Schäffer, Theodor; Sonne, Eduard (Hg.): Die Brücken im Allgemeinen. Steinerne und hölzerne Brücken. Aquädukt- und Kanalbrücken, Kunstformen des Brückenbaues. Unter Mitarbeit von Reinhard Baumeister, Friedrich Heinzerling und Georg Mehrstens. 2. Aufl. Leipzig: Engelmann 1886. (Handbuch der Ingenieurwissenschaften in vier Bänden. Bd. 2).

Schiffner 1886:

Schiffner, Friedrich: Beobachtungen über die Erhärtung von Portland-Zement in längerer Dauer. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 70, S. 418.

Schlichting 1888:

Schlichting, Julius: Flussregulirungen in Süddeutschland. In: *Deutsche Bauzeitung* (1888), Nr. 50; 52; 56, S. 297–300; 310–314; 333–337.

Schlierholz 1870:

Schlierholz, Joseph: Ueber Beton-Verwendung zu Hochbauzwecken, hauptsächlich zu ganzen Gebäuden. In: *Allgemeine Bauzeitung* Jg. 35 (1870), S. 260–265.

Schlierholz 1876:

Schlierholz, Joseph: Hochbauten der Königlich Württembergischen Donau-, Allgäu- und Hohenzollern-Bahn. Stuttgart: Wittwer 1876.

Schmidt 1908:

Schmidt, A.: Schiefe gewölbte Eisenbahnbrücke über die Weißeritz bei Potschappel (Dresden). In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 42 (1908), Nr. 64; 65, S. 434–438; 442–447.

Schmidt 1999:

Schmidt, Hartwig (Hg.): Zur Geschichte des Stahlbetonbaus – Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910. Berlin: Ernst & Sohn 1999 (Beton- und Stahlbetonbau Spezial (Sonderheft)).

Schmölcke 1879:

Schmölcke, J. u.a: Erwiderungen zu der Mittheilung über Belastungsproben von Gewölbbögen in Nr. 71 cr. der D. Bztg. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 13 (1879), Nr. 103, S. 528–529.

Schönbrunn 1899; 1900:

Schönbrunn: Ueber Gelenkbrücken aus Beton. In: *Süddeutsche Bauzeitung* Jg. 9. u. 10 (1899; 1900), Nr. 52; 1, S. 410–411; 5–7.

Schönbrunn 1900:

Schönbrunn: Über Gelenkebrücken aus Beton. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 34 (1900), Nr. 2; 3; 10, S. 10–12; 17–18; 64.

Schönhöfer 1911:

Schönhöfer, Robert: Die Haupt-, Neben- und Hilfsgerüste im Brückenbau. Ein Lehr- und

Nachschlagebuch über die auf dem Gebiete des Brückenbaues vorkommenden Gerüste.
Berlin: Ernst & Sohn 1911.

Schumann 1886a:

Schumann, C.: Nochmals Schlacken-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 16, S. 96.

Schumann 1886b:

Schumann, C.: Ueber Hochofenschlacken und Schlackenzement (sogen. Puzzolan-Zement) und deren Werth gegenüber Portland-Zement. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 20 (1886), Nr. 3, S. 14–19.

Schürch 1910:

Schürch, Hermann: Die neue Brücke über die Mosel bei Novéant. In: *Armierter Beton* (1910), Nr. 1; 2; 3, S. 1–16; 49–67; 113–125.

Schürch 1916:

Schürch, Hermann: Wärmeeinfluss und Wärmebeobachtungen bei Betongewölben. In: *Armierter Beton* Jg. 9 (1916), Nr. 10–12, S. 233–241; 271–279; 293–303.

Schuster 1900:

Schuster: Berechnung der in den Gelenken steinerner Brücken auftretenden grössten Pressung. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 20 (1900), Nr. 38, S. 232.

Schweizerische Kommission 1909:

Schweizerische Kommission des armierten Beton: Vorschriften über Bauten in armiertem Beton, vom 30.04.1909. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 54, Nr. 13, S. 185–189.

Schwering 1881:

Schwering, Ludwig: Angelegenheiten des Vereins. Wochenversammlung am 23. Februar 1881. Einsturz einer Cement-Beton-Brücke. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 27 (1881), S. 346.

Schwering, Schlierholz 1881:

Schwering, Ludwig; Schlierholz, Joseph von: Zusammenstellung der über Beton-Bauten im Gebiete des Verbandes deutscher Architekten- und Ingenieur-Vereine gemachten Erfahrungen. Nach den Mittheilungen der Einzel-Vereine bearbeitet von dem Architekten- und Ingenieur-Verein zu Hannover und dem Württembergischen Verein für Baukunde. In: *Zeitschrift für Baukunde* Jg. 40 (1881), S. 519–552.

Seeliger 1995:

Seeliger, Matthias: Archivalien des Bauunternehmers B. Liebold im Stadtarchiv Holzminden. Holzminden: Heimat- und Geschichtsverein Holzminden e. V. 1995. (Archivarbeit im Landkreis Holzminden. 8).

Seeliger 2004:

Seeliger, Matthias: Betonbau in der Provinz – Die Vorwohler Zementbaugesellschaft. In: Uta Hassler und Hartwig Schmidt (Hg.): Häuser aus Beton. Vom Stampfbeton zum Großtafelbau. Tübingen: Wasmuth 2004, S. 47–57.

Séjourné 1886:

Séjourné, Paul Marie: Construction des Ponts du Castelet, de Lavaur et Antoinette. In: *Annales des ponts et chaussées* (1886 2e semestre), S. 409–549.

Séjourné 1913a:

Séjourné, Paul Marie: 1^{re} partie: Voûtes inarticulées. Livre 1: Pleins cintres et ellipses. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils 1913. (Grandes voûtes. Bd. 1 von 6 Bänden).

Séjourné 1913b:

Séjourné, Paul Marie: 1^{re} partie: Voûtes inarticulées. Livre 1: Arcs peu surbaissés. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils 1913. (Grandes voûtes. Bd. 2 von 6 Bänden).

Séjourné 1913c:

Séjourné, Paul Marie: 1^{re} partie: Voûtes inarticulées. Livre 1: Arcs assez surbaissés. Livre 2: Ce que l'expérience enseigne de spécial aux voûtes inarticulées. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils 1913. (Grandes voûtes. Bd. 3 von 6 Bänden).

Séjourné 1913d:

Séjourné, Paul Marie: 2^{me} partie: Voûtes articulées. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils 1913. (Grandes voûtes. Bd. 4 von 6 Bänden).

Séjourné 1914:

Séjourné, Paul Marie: 3^{me} partie: Ce que l'expérience enseigne de commun a toutes les voûtes. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils 1914. (Grandes voûtes. Bd. 5 von 6 Bänden).

Séjourné 1916:

Séjourné, Paul Marie: Appendice. Bourges: Imprimerie Vve Tardy-Pigelet et Fils 1916. (Grandes voûtes. Bd. 6 von 6 Bänden).

Selinka 2012:

Selinka, Wilfried: Eyach-Brücken unter der Lupe Südwest Presse. Online verfügbar unter <file:///V:/Beton/Objekte/OwingenEyachbruecke/Eyach-Br%C3%BCcken%20unter%20der%20Lupe%20%20S%C3%BCdwest%20Presse%20Online.htm>, zuletzt aktualisiert am 13.09.2012, zuletzt geprüft am 20.03.2015.

Selinka 2013:

Selinka, Wilfried: Landwirte ärgern sich über Verzögerung Hohenzollerische Zeitung. Online verfügbar unter <http://www.swp.de/hechingen/lokales/haigerloch/Landwirte-aergern-sich-ueber-Verzoegerung;art5608,2005427>, zuletzt aktualisiert am 15.05.2013, zuletzt geprüft am 12.03.2015.

Senff 1812:

Senff, Erdmann Friedrich: Über absolute Sicherung gegen Brandnoth als Fortsetzung des vom Baumeister Steiner im Jahr 1803 herausgegebenen Entwurfs einer neuen durchaus feuerfesten Bauart etc. Leipzig: Barth 1812.

Siegrist 1914:

Siegrist, W.: Vom Bau der viergeleistigen Eisenbahnbrücke über den Neckar und des Rosensteintunnels bei Cannstatt. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 64 (1914), Nr. 15–19; 22; 23, S. 165–167; 176–179; 185–187; 195–199; 209–211; 240–242; 245–249.

Smeaton 1791:

Smeaton, John: A Narrative of the Building and a Description of the Construction of the Edystone Lighthouse with stone: To which is subjoined, an Appendix, giving some Account of the Lighthouse on the Spurn Point, built upon a sand. London: Hughs 1791.

Spangenberg 1914:

Spangenberg, Julius Heinrich: Zwei Betonbauten vom Stuttgarter Bahnhof-Umbau. Der Doppeltunnel durch den Rosenstein und die viergleisige Eisenbahnbrücke über den Neckar. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. 11 (1914), Nr. 10–13, S. 73–80; 81–84; 89–93; 97–102.

SPD Ortsverein München-Au:

SPD Ortsverein München-Au: Instandsetzung der Straßenbrücke über die Gebssattelstraße mit Treppenanlage. Online verfügbar unter <http://www.spd-muenchen-au.de/archiv/strassen/Gebssattelbruecke.html>, zuletzt geprüft am 12.03.2015.

StALB, Sign. E 166 Bü 4312:

Staatsarchiv Ludwigsburg: Korrektur der Donau im Baudistrikt II auf den Markungen Donaustetten und Erbach, Staatsbeiträge an die Gemeinden Donaustetten und Erbach zur Unterhaltung der Donaukorrektur im Baudistrikt II. Signatur E 166 Bü 4312.

StALB, Sign. E 166 Bü 4313:

Staatsarchiv Ludwigsburg: Korrektur der Donau im Baudistrikt III auf den Markungen Erbach und Dellmensingen, Bau einer neuen Brücke über die Donau bei Erbach und Verlegung der Nachbarschaftsstraße Erbach-Dellmensingen, Bau einer gewölbten Betonbrücke über die Westrach bei Erbach in Verbindung mit der Donaukorrektur, Staatsbeiträge an die Gemeinden Erbach und Dellmensingen zur Unterhaltung der Donaukorrektur im Baudistrikt III. Signatur E 166 Bü 4313.

StALB, Sign. E 166 Bü 5689:

Staatsarchiv Ludwigsburg: Verbesserung des Murrlaus im Oberamt Backnang auf den Markungen Backnang, Oppenweiler mit Rüflensmühle, Reichenberg mit Aichelbach, Ellenweiler und Zell sowie Sulzbach an der Murr, Staatsbeiträge an die Gemeinden zu diesen Verbesserungen. Signatur E 166 Bü 5689.

StALB, Sign. E 166 Bü 4298:

Staatsarchiv Ludwigsburg: Staatsbeitrag an die Stadtgemeinde Ehingen zum Umbau der Schmiedbrücke in der Bahnhofstraße zu Ehingen. Signatur E 166 Bü 4298.

StALB, Sign. E 166 Bü 1612:

Staatsarchiv Ludwigsburg: Bau einer Betonbrücke über den Hammerkanal (Neckarfloßstraße) in Esslingen im Zug der verlängerten Neckarstraße durch die Stadtgemeinde Esslingen. Signatur E 166 Bü 1612.

StAM, Sign. DB 1419:

Staatsarchiv München: Hauptbahnlinie Mühldorf–Freilassing, Brückenbauten. Signatur DB 1419.

StASIG, Sign. Wü 65/9 T 2–4 Nr. 2072:

Staatsarchiv Sigmaringen: Brückenbauwesen in Ehingen, mit Längen- und Querprofil. Signatur Wü 65/9 T 2–4 Nr. 2072.

ANHANG

BAmtBB, Sign. keine:

Stadt Bad Berka, Bauamt: Unterlagen zum Bau der Brücke in Bad Berka. Vertrag, Dokumentation der Probelastung. Signatur keine.

Stadt Esslingen am Neckar 2006:

Stadt Esslingen am Neckar (Hg.): Die Esslinger Stadtkanäle im Spiegel von Geschichte, Planung und Kultur. Beiträge anlässlich der Vortragsreihe wasser/reflexionen 2. bis 29. Juni 2005. Esslingen: Stadt Esslingen 2006.

Stadt Staßfurt – Der Oberbürgermeister 2013–2014:

Stadt Staßfurt – Der Oberbürgermeister: Ersatzneubau der Bodebrücke. Online verfügbar unter

http://www.bodebruecke.stassfurt.de/galerien/Fotogalerie%2520August%25202013/73_20-08-2013.JPG, zuletzt geprüft am 09.09.2013.

StadtAIK, Sign. 2186:

Stadt- und Kreisarchiv Arnstadt: Bestand Stadt Arnstadt, Brücke über die Gera bei der Hammerecke, 1870–1906, 1932. Signatur 2186.

StadtAD, Sign. 0-1-18:

Stadtarchiv Düsseldorf: Allgemeine Kunst- und Gewerbeausstellung 1880. Signatur 0-1-18.

StadtAES, Sign. Tiefbauamt 52:

Stadtarchiv Esslingen a. N.: Die Hammerkanalbrücke in Esslingen. Signatur Tiefbauamt 52.

StadtAFR, Sign. StadtAF, C3/120/13:

Stadtarchiv Freiburg: Personalakte Karl von Müller. Signatur StadtAF, C3/120/13.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 53:

Stadtarchiv Holzminden: B. Liebold & Co. A.-G., Holzminden, Berlin-Schöneberg und Cassel: Unsere Bauausführungen im Jahre 1909/10. Signatur E.4 Nr. 53.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 56:

Stadtarchiv Holzminden: B. Liebold & Co. A.-G., Holzminden, Berlin-Schöneberg und Cassel: Unsere Bauausführungen im Jahre 1913. Signatur E.4 Nr. 56.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 50:

Stadtarchiv Holzminden: B. Liebold & Co. A.-G., Holzminden: Neue Bauausführungen 1907/08. Signatur E.4 Nr. 50.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 214:

Stadtarchiv Holzminden: Holzminden, Kanalisierung des Herrenbaches. Signatur E.4 Nr. 214.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 219:

Stadtarchiv Holzminden: Inzigkofen, Donaubrücke. Signatur E.4 Nr. 219.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 239:

Stadtarchiv Holzminden: Lautrach, Illerbrücke. Signatur E.4 Nr. 239.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 36:

Stadtarchiv Holzminden: Liebold & Co., Langebrück-Dresden: Bauausführungen im Jahre 1901. Signatur E.4 Nr. 36.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 13:

Stadtarchiv Holzminden: Materialsammlung zur Firmengeschichte und den ausgeführten Bauten, größtenteils von Max Liebold. Darin: Brückenbeschreibungen, Korrespondenz usw. Signatur E.4 Nr. 13.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 251:

Stadtarchiv Holzminden: Mehring Moselbrücke. Signatur E.4 Nr. 251.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 262:

Stadtarchiv Holzminden: Niederschlema, Muldenbrücke. Signatur E.4 Nr. 262.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 290:

Stadtarchiv Holzminden: Scharfenstein, Zschopaubrücke. Signatur E.4 Nr. 290.

StadtAHOL, Sign. E.4 Nr. 3:

Stadtarchiv Holzminden: Schriftstellerische Arbeit. Signatur E.4 Nr. 3.

DMA, Sign. FA 010/266:

Stadtbauamt Schaffhausen: Einwölbung des Gerberbaches. Darstellung der Einwölbung desselben in Beton 20.12.1868. Signatur FA 010/266.

Stanek 1903:

Stanek, Julius: Beton-Bogenbrücken über die Schlitza bei Tarvis. In: *Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst* Jg. 9 (1903), Nr. 22, S. 344–350.

Stegmann 2014:

Stegmann, Knut: Das Bauunternehmen Dyckerhoff & Widmann. Zu den Anfängen des Betonbaus in Deutschland 1865–1918. Tübingen: Wasmuth Verlag 2014. (Zugl.: Dissertation, Department Architektur, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich. 2010).

Stegmann 2015:

Stegmann, Knut: Experimental Cultures in Early Concrete Construction. In: Brian Bowen, Donald Friedman, Thomas Leslie und John Ochsendorf (Hg.): *Proceedings*. Bd. 3. Fifth International Congress on Construction History. Construction History Society of America, Chicago. 03.–07.06.2015. 3 Bände. Chicago 2015, S. 387–394.

Steiner 1803:

Steiner, Johann Friedrich Rudolph: Entwurf einer neuen durchaus feuerfesten Bauart mit gewölbten Decken und Dachungen zur Sicherheit und Wohlfahrt der menschlichen Wohnungen und anderer Gebäude sämtlichen höchst und hohen Regenten und Fürsten Teutschlands so wie auch der ganzen Nation desselben in Ehrfurcht gewidmet. Weimar: Hoffmann 1803.

Stedle et al. 2009:

Stedle, Andrea; et al.: Stadt Esslingen am Neckar. Ostfildern: Thorbecke 2009. (Denkmaltopographie Bundesrepublik Deutschland; Kulturdenkmale in Baden-Württemberg; I. Regierungsbezirk Stuttgart. Bd. I.2.1).

Steuer 2011:

Steuer, Robert: Ehemalige Eisenbahnbrücke zwischen Lautrach und Illerbeuren ist sanierungsbedürftig. In: all-in.de – das Allgäu online! Online verfügbar unter

<http://www.all-in.de/nachrichten/lokales/Ehemalige-Eisenbahnbruecke-zwischen-Lautrach-und-Illerbeuren-ist-sanierungsbeduerftig;art26090,953628>, zuletzt aktualisiert am 08.04.2011, zuletzt geprüft am 19.05.2014.

Stiehl 1895:

Stiehl: Zum Bau gewölbter Brücken. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 15 (1895), Nr. 21, S. 228–230.

Stiglat 1995:

Stiglat, Klaus: Die Illerbrücken in Kempten/Allgäu. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Jg. 90 (1995), Nr. 4, S. 106–107.

Stiglat 1997:

Stiglat, Klaus: Brücken am Weg. Frühe Brücken aus Eisen und Beton in Deutschland und Frankreich. Berlin: Ernst & Sohn 1997.

Stiglat 1999:

Stiglat, Klaus: Erste Betonbrücken. In: Manfred Abel und Wilhelm Buschmeyer (Hg.): *Betonbau in Forschung und Praxis. Festschrift zum 60. Geburtstag von György Iványi*. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik 1999, S. 137–142.

Stiglat 1999:

Stiglat, Klaus: Erste Brücken aus Beton. In: Hartwig Schmidt (Hg.): *Zur Geschichte des Stahlbetonbaus – Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910*. Berlin: Ernst & Sohn 1999, S. 58–65.

Stiglat 2004:

Stiglat, Klaus: François-Martin Lebrun: Erste Häuser aus Beton. In: Uta Hassler und Hartwig Schmidt (Hg.): *Häuser aus Beton. Vom Stampfbeton zum Großtafelbau*. Tübingen: Wasmuth 2004, S. 40–46.

Stiglat 2012:

Stiglat, Klaus: Aus der Frühzeit des Betonbaus. In: *Bautechnik* Jg. 89 (2012), Nr. 7, S. 484–491.

TBAmtKE, Sign. keine:

Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten: Unterlagen über die Illerbrücken Kempten. Signatur keine.

TBAmtKE, Sign. keine:

Amt für Tiefbau und Verkehr der Stadt Kempten: Unterlagen über die Rottachbrücke in Kempten-Rothkreuz. Signatur keine.

Ström 1842:

Ström: Gegossenes Kalkmörtel-Haus. Eine neue Bauart von Rüdin. Aus dem Schwedischen übersetzt. In: *Kunst- und Gewebeblatt des Polytechnischen Vereins für das Königreich Bayern* Jg. 28 (1842), Nr. 8 u. 9, S. 502–514.

Strukel 1913:

Strukel, Michael: *Bewegliche und steinerne Brücken*. Leipzig: Twietmeyer 1913. (Der Brückenbau. Lehr- und Nachschlagebuch für Studierende und Praktiker. Bd. 2 von 2 Bänden).

Swittalek 1976:

Swittalek, Peter: Das Technische Denkmal. In: *Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege* (1976), S. 110–117.

Tavernier 1899:

Tavernier, Henri Jacques: Maçonneries avec joints métalliques coulés. In: *Annales des ponts et chaussées* (1899 3e trimestre), S. 77–150.

Tavernier 1907:

Tavernier, Henri Jacques: Pont à arcs de pierre de taille articulé à la clef et aux naissances avec joints coulés en zinc. In: *Annales des ponts et chaussées* Jg. 77 (1907), Nr. V, S. 6–58.

Teichmann 1904:

Teichmann, Alfred: Zahlenbeispiel zur statischen Berechnung von massiven Dreigelenkbrücken vermittelt Einflusslinien. Wiesbaden: Kreidel 1904.

Tetmajer 1883:

Tetmajer, Ludwig: Der Portland-Cementbéton auf der Schweiz. Landesausstellung. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 2 (1883), Nr. 20, S. 127–130.

Tetmajer 1884:

Tetmajer, Ludwig: Von der Wirkung einiger Zumischmittel auf den Portland-Cement. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 3 (1884), Nr. 24, S. 143–148.

Tetmajer 1885:

Tetmajer, Ludwig: Zur Frage der Wirkung einiger Zumischmittel auf den Portland-Cement. In: *Schweizerische Bauzeitung* Jg. 6 (1885), Nr. 14, S. 79–83.

Thury 1841:

Thury, Héricart de Lebrun François Martin: Rapport sur un Mémoire relatif à la construction du pont de Grisolles sur le canal latéral à la Garonne, par M. Lebrun jeune, architecte à Montauban (Tarn-et-Garonne). In: *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences* Jg. 13 (1841), S. 298–302.

Tobler, Lommatzsch 1925–2002:

Tobler, Adolf; Lommatzsch, Erhard: Altfranzösisches Wörterbuch. Wiesbaden: Steiner 1925–2002.

Tolkmitt 1885:

Tolkmitt, Gustav: Das Entwerfen und die Berechnung der Brückengewölbe. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 35 (1885), S. 265–280.

Tolkmitt 1892:

Tolkmitt, Gustav: Gewölbte Brücken in Coepenick. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 42 (1892), S. 355–372.

Tolkmitt 1895:

Tolkmitt, Gustav: Leitfaden für das Entwerfen und die Berechnung gewölbter Brücken. Berlin: Ernst & Sohn 1895.

Tolkmitt, Laskus 1902:

Tolkmitt, Gustav; Laskus, August: Leitfaden für das Entwerfen und die Berechnung gewölbter Brücken. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn 1902.

Treussart 1829:

Treussart, Clément Louis: Mémoire sur les mortiers hydrauliques et sur les mortiers ordinaires. Paris: Carilian-Gœury; Anselin; Malher et compagnie 1829.

Umweltamt der Stadt Dresden 2006:

Umweltamt der Stadt Dresden: Umweltbericht 2001–2004 Fakten zur Umwelt. Dresden. Online verfügbar unter http://www.dresden.de/media/pdf_neu/umwelt/UB_Fakten_2001_2004.pdf, zuletzt aktualisiert am 03.2006, zuletzt geprüft am 16.03.2015.

Umweltamt der Stadt Dresden 2007:

Umweltamt der Stadt Dresden: Umweltbericht 2005/2006 Fakten zur Umwelt. Anlage 2: Hochwasserschadensbeseitigung Weißeritz. Dresden. Online verfügbar unter http://www.dresden.de/media/pdf_neu/umwelt/ub_05_06_Anlage2.pdf, zuletzt aktualisiert am 08.2007, zuletzt geprüft am 12.03.2015.

Unruh v., Benda 1854:

Unruh v.; Benda: Mittheilungen über den Bau der Elb-Brücke in Wittenberge. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 4 (1854), Nr. 2: 32, S. 7–44; 485–502.

Veihelmann (Veröffentlichung voraussichtlich 2015):

Veihelmann, Karen: Der Stampfbetonbrückenbau am Beispiel der Illerbrücke in Lautrach (1903–1904). In: Koldewey-Gesellschaft (Hg.): Tagungsband. 48. Tagung für Ausgrabungswissenschaft und Bauforschung. Koldewey-Gesellschaft, Erfurt. 29.05.–01.06.2014 (Veröffentlichung voraussichtlich 2015).

Veihelmann 2015a:

Veihelmann, Karen: Die Hammerkanalbrücke in Esslingen am Neckar. Die erste Generation von Dreigelenkbogen aus Stampfbeton. In: *Denkmalpflege in Baden-Württemberg. Nachrichtenblatt der Landesdenkmalpflege* Jg. 44 (2015), Nr. 1, S. 26–31.

Veihelmann 2015b:

Veihelmann, Karen: Frühe Betonbrücken in Bayern. In: *Denkmalpflege Informationen* (2015), Nr. 161, S. 46–50.

Veihelmann 2015c:

Veihelmann, Karen: Frühgeschichte des modernen Konstruktionsbetons. Teil 3: Vom Pisé zum Stampfbeton. In: *Bautechnik* Jg. 92 (2015), Nr. 6, S. 424–431.

Veihelmann, Holzer 2012:

Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Early concrete bridges without reinforcement. In: Jerzy Jazienko (Hg.): Tagungsband. Bd. 3. 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions – SAHC 2012, Breslau. 15.–17.10.2012. 3 Bände. Breslau: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne 2012, S. 2245–2250.

Veihelmann, Holzer 2013:

Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Deutschlands älteste Betonbrücken. In: *Bautechnik* Jg. 90 (2013), Nr. 6, S. 376–379.

Veihelmann, Holzer 2014:

Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Ein Pionier des Betonbrückenbaus. In: *Industriekultur* Jg. 20 (2014), Nr. 2, S. 6–7.

Veihelmann, Holzer 2015:

Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Die Verwendung von Gelenken im Massivbrückenbau. Zur Geschichte des Dreigelenkbogens. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Jg. 111 (2016), Nr. 2, S. 99–112.

Veihelmann, Holzer (Veröffentlichung voraussichtlich 2015):

Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Frühe Bogenbrücken aus Beton. In: Martin Trautz (Hg.): Tagungsband. 1. Jahrestagung der Gesellschaft für Bautechnikgeschichte. RWTH, Aachen. 08.11.2013 (Veröffentlichung voraussichtlich 2015).

Veihelmann, Holzer (Veröffentlichung voraussichtlich 2016):

Veihelmann, Karen; Holzer, Stefan M.: Articulation des voûtes. In: Laurent Baridon, François Fleury, Antonella Mastrorilli, Laurent Mouterde und Nicolas Reveyron (Hg.): Actes. Deuxième Congrès Francophone d'Histoire de la Construction. École nationale supérieure d'Architecture, Lyon. 29.–31.01.2014. Paris: Picard (Veröffentlichung voraussichtlich 2016).

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1893:

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten: Protokoll der Verhandlungen des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten und der Section Cement des Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaaren, Kalk und Cement am 3. und 4. März 1893. Berlin: Funcke und Naeter 1893.

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1894:

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten: Protokoll der Verhandlungen des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten und der Section Cement des Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaaren, Kalk und Cement am 23. und 24. Februar 1894. Berlin: Funcke und Naeter 1894.

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten 1895:

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten: Protokoll der Verhandlungen des Vereins Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten und der Section Cement des Deutschen Vereins für Fabrikation von Ziegeln, Thonwaaren, Kalk und Cement am 26. und 27. Februar 1895. Berlin: Funcke und Naeter 1895.

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten E. V. 1909:

Verein Deutscher Portland-Cement-Fabrikanten E. V.: Portland-Zement und die Schlackenmischfrage. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. VI (1909), Nr. 16, S. 65–67.

Verein Deutscher Portland-Zement-Fabrikanten, Deutscher Beton-Verein 1902:

Verein Deutscher Portland-Zement-Fabrikanten; Deutscher Beton-Verein: Deutsche

Portland-Cement- und Beton-Industrie auf der Düsseldorfer Ausstellung 1902. Berlin: Scherl 1902.

Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland 2004: Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland: Arbeitsblatt 1 – Internationale Charta über die Konservierung und Restaurierung von Denkmälern und Ensembles (Denkmalbereiche). Charta von Venedig. Aufgestellt 1964, dt. Übers. 1989. Online verfügbar unter <http://www.denkmalpflege-forum.de/Download/Nr01.pdf>, zuletzt aktualisiert am 11.02.2004, zuletzt geprüft am 18.03.2015.

Vicat 1818:

Vicat, Louis-Joseph: Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires. Paris: Didot 1818.

Vicat 1831:

Vicat, Louis-Joseph: Nachrichten von den Beobachtungen einer periodischen Bewegung der Gewölbe der Brücke über die Dordogne bei Souillac. Verfasst von Herrn Vicat und aus dem Recueil de dessins etc. de l'école des ponts et chaussées tom. I gezogen vom Herrn Dr. Dietlein zu Berlin. In: *Journal für die Baukunst* (1831), Nr. 4, S. 461–465.

Vicat 1832:

Vicat, Louis-Joseph: 4. Bemerkungen beim Bau der Brücke über die Dordogne bei Souillac. Vom Herrn Vicat. Aus dem Recueil de de planches. de l'école des ponts et chaussées tom. 2.1827 gezogen vom Herrn Dr. Dietlein zu Berlin. In: *Journal für die Baukunst* Jg. 5 (1832), Nr. 1, S. 73–86.

Vicat 1856:

Vicat, Louis-Joseph: Traité pratique et théorique de la composition des mortiers, ciments et gangues a pouzzolanes et de leur emploi dans toutes sortes de travaux. Suivi des moyens d'en apprécier la durée dans les constuctions a la mer. Grenoble: Imprimerie Maisonville 1856.

Voch 1780:

Voch, Lukas: Abhandlung der Brückenbaukunst, worinnen sowohl was bey hölzernen Brücken von verschiedener Art als auch bey dem Baue der steinernen zu beobachten, aufs deutlichste angezeigt wird. Augsburg: Matthäus Riegers 1780.

Vockrodt 2000:

Vockrodt, Hans-Jörg: Instandsetzung und Erweiterung der Krämpfertorbrücke über den Flutgraben in Erfurt. In: *Bautechnik* Jg. 77 (2000), Nr. 2, S. 93–100.

Vockrodt et al. 2003:

Vockrodt, Hans-Jörg; Feistel, Dieter; Stubbe, Jürgen: Handbuch Instandsetzung von Massivbrücken. Basel u. a.: Birkhäuser 2003.

Vockrodt 2015:

Vockrodt, Hans-Jörg: Erfurt – Brücken der Gründerzeit. In: *Bautechnik* Jg. 92 (2015), Nr. 2, S. 144–151.

Vockrodt, Schwesinger 2002:

Vockrodt, Hans-Jörg; Schwesinger, Peter: Experimentelle Tragfähigkeitsanalyse einer historischen Bogenbrücke in Erfurt. In: *Bautechnik* Jg. 79 (2002), Nr. 6, S. 355–367.

W. 1899:

W.: Kämpfer-Doppelgelenke? In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 33 (1899), Nr. 17, S. 105.

Wahl 1786 Wahl, Friedrich Gerhard: Aus Erfahrungen gesammelter theoretisch-praktischer Unterricht in dem Strassen- und Brückenbau. Zweibrücken: Gebrüder Hahn 1786.

Waibel 1904:

Waibel, J. M.: Eisenbahnbrücken aus Beton in Bayern. In: *Beton und Eisen* Jg. 3 (1904), Nr. 5, S. 260–261.

Wasser- und Schifffahrtsamt Rheine 2014:

Wasser- und Schifffahrtsamt Rheine: Erläuterungsbericht zum Planfeststellungsverfahren für den Ausbau des Dortmund-Ems-Kanals (DEK). Online verfügbar unter

[http://www.ast-](http://www.ast-west.gdws.wsv.de/aktuelles/Planfeststellung/Verfahren/Dateien/Prinzbruecke/Teil_1_Erlaeuterungsbericht.pdf)

[west.gdws.wsv.de/aktuelles/Planfeststellung/Verfahren/Dateien/Prinzbruecke/Teil_1_Erlaeuterungsbericht.pdf](http://www.ast-west.gdws.wsv.de/aktuelles/Planfeststellung/Verfahren/Dateien/Prinzbruecke/Teil_1_Erlaeuterungsbericht.pdf), zuletzt aktualisiert am 25.03.2014, zuletzt geprüft am 06.03.2015.

Weber 1870:

Weber, Friedrich: Bauwerke aus Concret. In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 14 (1870), Nr. 4, S. 61–62.

Wedeke 1850:

Wedeke, Johann Christian: Der Bau mit gestampftem Mörtel. Quedlinburg, Leipzig: Gottfried Basse 1850.

Weese, Gehler 1909:

Weese; Gehler: Belastungsprobe der Beton-Gelenkbrücke der Düsseldorfer Ausstellung 1902. In: *Deutsche Bauzeitung – Mitteilungen über Zement, Beton- und Eisenbetonbau* Jg. 43 (1909), Nr. 9; 10, S. 40; 41–42.

Weissenborn 1914:

Weissenborn, Bernhard: Die Cröllwitzer Papierfabrik in den zweihundert Jahren ihres Bestehens nebst Nachrichten über ihre Vorgängerin die hallische Papiermühle. Halle a. d. S: Buchdruckerei des Waisenhauses 1914.

Weissenborn 1921:

Weissenborn, Bernhard: Zum fünfzigjährigen Jubiläum der Cröllwitzer Actien-Papier-Fabrik. Halle: Gebauer-Schwetschke 1921.

Weller 2014:

Weller, Andreas: Dank Fluthilfe: Augustusbrücke wird bald saniert. Das marode Bauwerk soll wieder aussehen wie nach dem Neubau 1910. Dies kostet mehr als 27 Millionen Eurosz-online. Online verfügbar unter <http://www.sz-online.de/nachrichten/dank-fluthilfe-augustusbruecke-wird-bald-saniert-2796891.html>, zuletzt aktualisiert am 15.03.2014, zuletzt geprüft am 21.07.2014.

Wetzck 2010:

Wetzck, Volker: Brueckenlager. 1850–1950. Dissertation, Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung, Brandenburgische Technische Universität, Cottbus, 13.12.2010.

Weyrauch 1894:

Weyrauch: Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 40 (1894), S. 131–144.

Weyrauch 1897:

Weyrauch: Einige Ergebnisse betreffend die Wiener Gewölbe-Versuche. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieur-Vereins zu Hannover* Jg. 43 (1897), S. 99–102; 105–109.

Wilke 1869:

Wilke, R.: Der Bau der Striegisthal-Ueberbrückung bei Freiberg. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 19 (1869), Nr. 14, S. 205–230.

Winkler 1868:

Winkler, Emil: Die Lehre von der Elasticitaet und Festigkeit mit besonderer Rücksicht auf ihre Anwendung in der Technik, für polytechnische Schulen, Bauakademien, Ingenieure, Maschinenbauer, Architekten, etc. 1. Theil. 2 Bände. Prag: H. Dominicus 1868.

Winkler 1874:

Winkler, Emil: Vorträge über Brückenbau gehalten an der k. k. technischen Hochschule in Wien. Steinernen Brücken. Wien: Verlag der Lehrkanzel für Eisenbahn- und Brückenbau an der k. k. technischen Hochschule 1874.

Winkler 1878:

Winkler, Emil: Vorträge über Statik der Baukonstruktionen gehalten an der k. Bauakademie in Berlin. Für die Hörer des Verfassers als Manuscript gedruckt. Berlin: o. V. 1878.

Winkler 1879; 1880:

Winkler, Emil: Lage der Stützlinie im Gewölbe. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 13; 14 (1879; 1880), Nr. 23, 25; 11, S. 117–119, 127–130; 58–60.

Winter 1894:

Winter, Paul: Ueber Betonbauten bei Eisenbahnanlagen. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 14 (1894), Nr. 40; 41, S. 426–427; 438–439.

Wittmann 1887:

Wittmann, Wilhelm: Sind Gewölbe möglich ohne Seitenschub auf die Widerlager? In: *Zeitschrift für Bauhandwerker* Jg. 31 (1887), Nr. 13–15, S. 97–99; 111–112; 118–120.

Wolff 1879:

Wolff, E. W.: Ueber Mörtel-Mischungen und Mörtel-Proben. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 13 (1879), Nr. 57, S. 292–293.

Wolff 1903:

Wolff, William: Gewölbte Eisenbahnbrücke von 70 m Spannweite über die Adda bei Morbegno in Italien. In: *Centralblatt der Bauverwaltung* Jg. 23 (1903), Nr. 77, S. 478–480.

Zangemeister 1912:

Zangemeister: Neubau der Dove-Brücke in Charlottenburg. In: *Deutsche Bauzeitung* Jg. 46 (1912), Nr. 22; 25, S. 205–208; 230–232.

Zessack 2012:

Zessack, Robert: Teufelsgraben-Aquädukt – Baudenkmal in Gefahr. Online verfügbar unter <http://www.denkmalschutz-immobilien.com/2012/11/teufelsgraben-aquadukt-baudenkmal-in-gefahr/>, zuletzt aktualisiert am 04.11.2012, zuletzt geprüft am 30.01.2015.

Ziurek 1861:

Ziurek, O. A.: Ueber Mörtel in baupolizeilicher, technischer und chemischer Beziehung. In: *Zeitschrift für Bauwesen* Jg. 11 (1861), S. 41–74.

PERSONEN UND UNTERNEHMEN

Im folgenden Personenindex sind die wichtigen, historischen Protagonisten unter Angabe ihrer Lebensdaten sowie die wichtigsten Unternehmer verzeichnet, wobei die Zuordnung bei manchen nicht ganz eindeutig ist. Dabei erfolgen Verweise lediglich auf diesbezügliche Textpassagen, nicht jedoch auf Literaturnachweise.

Aspdin, William (1816–1864)	34
Bach, Carl von (1847–1931)	33, 39, 187, 192–193, 199–201, A-140
Barkhausen, Georg (1849–1923)	198–199
Bauernfeind, Karl Maximilian v. (1818–1894)	132–133
Bauschinger, Johann (1834–1893)	187
Beaudemoulin, Louis Alexis (1790–1875)	95–96, A-67
Belgrand, Eugène (1810–1878)	57–58, A-18, B-126, B-135
Bélibidor, Bernard Forest de (1697–1761)	15
Beutel, Ferdinand (1852–1918)	139, 152, 190–191, 221–222, 246–251, 256
Bleibtreu, Hermann (1824–1881)	25
Bock, A.	112–113, 117, 171
Böhm, Theodor	176
Boistard, Louis Charles (1800–1863)	92, 158
Borgnis, Joseph Antoine (1781–1863)	45, 48
Böthcke, Ernst Samuel Heinrich (?–1830)	17, 41
Bourdelles, Jean Baptiste (1838–1899)	162, 180
Boussiron, Simon (1873–1958)	217, B-132
Braun, Paul (?–1919)	101, 116, 166–167, 173–174, 189, 191, 220
Brosselin, Gustave Pierre (1832–1902)	162, 178, 179, 180, 191, A-119
Bruyère, Louis (1758–1831)	51, 87
Büsing, Friedrich Wilhelm (1834–1904)	12, 26, 32, 63, 101, 108–111, 113, 129, 133, 142, 154, 253
Clericetti, Celeste (1835–1887)	160
Coignet, François (1814–1888)	37, 47–49, 58, 65, B-134
Cointeraux, François (1740–1830)	18, 19, 20, 41
Colberg, Otto (1870–1952)	124, 128–129, 154, 201
Crelle, August Leopold (1780–1855)	22
Croizette-Desnoyers, Louis Phil. (1816–1887)	95, 178
Debauve, Alphonse Alexis (1845–1907)	160
Delbrück, Werner Hugo Wilhelm (1868–1910)	73
Dewitz, Hermann	222
Dietrich, Emil (1844–1912)	9, 85, 101, 164
Dietz, Wilhelm (1850–1921)	211–213
Dieussart, Charles Philippe (1625–1696)	18–19
Dupuit, Jules (1804–1866)	94, 146, 150, 158–164, 167–168, 177–178, A-66, A-67, A-118
Durand-Claye, Léon Charles (1830–1905)	187, A-140

Dyckerhoff & Widmann (Unternehmer)	1, 3, 26, 32, 39, 61, 63, 66–67, 71, 73, 103, 114, 154, 175, 190, 193–194, 201–202, 240, 244, 256, A-26, A-109, B-9, B-17, B-27, B-32, B-35, B-51, B-55, B-68, B-69, B-73, B-94, B-121, B-122
Dyckerhoff, Eugen (1844–1924)	31, 63, 101, 123, 146, 154, 175, 197, 202
Dyckerhoff, Rudolf (1842–1917)	31, 37, 61
Emperger, Friedrich Ign. v. (Fritz) (1862–1942)	128, 139–142, 149, 155, 176, 199, 208
Engel, Friedrich (1821–1890)	23, 27, 42
Engesser, Friedrich (1848–1931)	67, 134
Feege & Gotthard (Unternehmer)	63, 65–66, 134, 163, 183, 256, A-26
Féline-Romany, Edmond-Jules (1806–?)	178
Fischer, Theodor (1862–1938)	240
Flamant, Alfred-Aimé (1839–1915)	178
Fleck, Georg	115–116, 156
Föppl, August (1854–1924)	212, 215
Frank, Wilhelm	222
Freyssinet, Marie Eugène Léon (1879–1962)	98, 182, 218, 219, 258, B-136, B-138
Fuller, William Barnard (1862–1973?)	38
Gariel & Garnier (Unternehmer)	57, 64, 153
Gauthey, Émiland-Marie (1732–1806)	87, 158, 159
Gehler, Willy (1876–1953)	141
Gilbrin, Georg	124–125, 128–130, 138, 152, 215
Gilly, David (1748–1808)	20
Goiffon, Georges Claude (1712–1776)	19
Haanen, Edmund van	30, 108
Harding, George Judd (1788–1860)	49, 64
Heigelin, Karl Marcell (1798–1833)	21, 42, 46
Heinzerling, Friedrich (1824–1906)	14, 161, 164, 168, A-118
Held, Karl	41, 103
Hermanek, Johann (1865–1905)	139, 244
Hertz, Heinrich Rudolf (1857–1894)	198–200, 203
Hoch, Anton (1842–1919)	10, 39, 109, 175
Hoffmann, E. H. (1822–1896)	9–10, 49–50, 60–61, 65, 68, 77–78, 101, 106–107, 137, 151, 175, 256–257, A-22, A-37
Housselle, Wilhelm (1841–1910)	77, 119, 146–149, A-109
Intze, Otto (1843–1904)	97, 122, 148, A-69, A-110
John, Johann Friedrich (1782–1847)	23–24, 34
Johnson, Isaac Charles (1811–1911)	34
Jori, Anton	143, 208
Keppler, J.	223–229, B-40
Koch, Alexander (1852–1923)	185
Kollmar, Alfred (1890–1971)	177, 230
Köpcke, Claus (1831–1911)	143, 164–168, 197–199, B-80

ANHANG

Krause, Friedrich (1790–ca. 1860)	22, 43, 104
Krone, A.	8, 106, 107, 120, 151, 258
Kunz (Unternehmer)	103, 190, B-25
La Rivière, Gaston Jean (1850–1907)	178
Lacordaire, Jean Auguste (1789–1860)	51–52, 55–56
Lagrené, Henri-Melchior de (1822–1887)	65, 95–96, A-67
Lamandé, Mandé-Corneille (1776–1837)	86–87
Landsberg, Theodor (1847–1915)	8, 257–258
Lauckhardt (Unternehmer)	67, A-27
Lebrun, François-Martin (1799–1849)	2, 24–25, 37, 43, 46–56, 103, B-137
Lebrun, Jean-Auguste (1796–?)	24, 46–49, 52–53, 55, 103
Leibbrand, Karl von (1839–1898)	8, 9, 70, 89, 106, 116, 123, 125, 132, 137–138, 145, 147, 162–170, 174–175, 178–179, 185, 187–189, 193, 221, 224, 226–227, 230, 256, B-36, B-37
Leibbrand, Max (1851–1925)	65, 88–89, 103, 106, 114–117, 128, 130, 137, 142–148, 152, 157, 169–175, 193, 207, 214–215, 221–222, 225, 227, 230, 256, 258, B-54
Liebold, Bernhard (1843–1916)	2, 13–14, 26–31, 36, 47, 51, 60–68, 72–84, 92, 99, 101, 105, 110, 116–117, 243, 248–250, 256, 261, A-27, A-37, A-38, A-40, A-42, B-15, B-16, B-46, B-66, B-67, B-75, B-77, B-86–B-88, B-91, B-99–B-104, B-107–B-109, B-118, B-119
Liebold, Max (1885–1978)	73
Mahiels, Armand (1857–?)	84, 112, 113, A-90
Maillart, Robert (1872–1940)	171, 179, 180, B-143
Mehrtens, Georg (1843–1917)	5–8, 14, 96, 150, 175, 177
Melan, Josef (1853–1941)	69, 89, 106, 123, 132–133, 149, 156, 162, 172, 186, 192, 193, 255
Mesnager, Augustin Charles (1862–1933)	182, 216, 217, 218, 219, A-172
Michaëlis, Wilhelm (1840–1911)	36
Mihálik, Johann von (1818–1892)	16, 25, 27, 39, 50, 59, 60, 64, 110–112, A-22
Miller, Oskar von (1855–1934)	231
Monier, Joseph (1823–1906)	70, 224
Mörsch, Emil (1872–1950)	137, 143, 203–213
Nakonz, Walter (1887–1969)	225, 228
Navier, Claude Louis Marie Henry (1785–1836)	87, 159
Örley, Leopold (1878–1936)	82, 140
Parker, James	34
Pasley, Charles William (1780–1861)	49
Perronet, Jean-Rodolphe (1708–1794)	86–89, 92, 145, 146
Pittel & Brausewetter (Unternehmer)	185

Pluyette, Charles Félix (1821–1866)	97
Preßprich, Gustav Adolph	116
Probst, F.	215, 258
Prochnow, Johann Gottlieb (1794–1873?)	22, 37, 43, 46
Prüssing, Godhard (1828–1903)	72–73, 80, B-109
Quietmeyer, Friedrich (1849–1938)	34
Reihling, Karl (?–1932)	100–101, 167
Rheinhard, August (1843–1891)	126, 143, 144, 147, 174, 257, B-34, B-42
Röder, Georg Ludwig August	126, 128
Rödlich, Hieronymus Franz (1767–1833)	21, 111
Rondelet, Jean Baptiste (1743–1829)	18, 45
Rozier, François (1734–1793)	19, 44–45, 48, 103
Rydin, Carl Gustaf (1798–1877)	20–22, A-6
Sager & Woerner (Unternehmer)	105, 190, 212, 239, A-144, B-8, B-18–B-23
Salzmann, Johann (1807–1869)	27, 61
Schaechterle, Karl (1879–1971)	131, 143, 208
Schlichting, Julius (1835–1894)	185
Schlierholz, Josef von (1817–1907)	28–29, 50
Schönbrunn	123, 134, 172
Schönhöfer, Robert (1878–1954)	83, 89, 100, 132–133
Schürch, Hermann (1881–1957)	141
Schwering, Ludwig (1846–1819)	13, 135
Séjourné, Paul Marie (1851–1936)	91, 107, 162, 163, 177, 178, 182, 190, 257, 259, B-129–B-131
Senff, Erdmann Friedrich (1741–1813)	41–42
Smeaton, John (1724–1792)	33, 44
Spangenberg, Heinrich (1879–1936)	112
Tavernier, Henri Jacques (1850–1932)	162, 181
Tetmajer, Ludwig von (1850–1905)	69
Thompson, Sanford Eleazer (1867–1949)	38
Thormann & Schneller (Unternehmer)	257, B-47
Tolkmitt, Gustav (1847–1900)	121–122, 148, 221, A-110
Treussart, Clément Louis (1779–?)	37, 49
Vicat, Joseph (1821–1902)	57, B-128
Vicat, Louis-Joseph (1786–1861)	16, 23–24, 34, 57, 138, B-128
Wedeke, Johann Christian (1791–1869)	42
Windschild & Langelott (Unternehmer)	122, 196, 199
Winkler, Emil (1835–1888)	107, 138, 144, 149, 162, 163, 213

INDEX DER GENANNTEN BRÜCKEN

Altenbeken	
Wiederaufbau Beke-Viadukt	71
Altenburg–Langenleuba	
Eisenbahnviadukte	176, 198, A-132, A-133, B-105
Arnstadt	
Gerabrücke	80, 243, A-44, B-107
Weißbrücke	B-108
Augustusburg	
Drahtseilbahnbrücke	B-64
Bad Berka	
Ilmbrücke	80, A-45, B-109
Bad Imnau	
Eyachbrücke	115, 130, 132, 179–180, 193–195, A-147
Bad Pyrmont	
Emmerbrücke	B-99
Bad Teinach	
Nagoldbrücke	8, 9, 138, 166, A-123, B-36
Bad Wildbad	
Enzbrücke	B-35
Guldebrücke	137
Reitersteg	B-34
Baiersbronn	
Forbachbrücke	137, 226, B-37
Murgbrücke	137, 226
Bärenhecke	
Müglitzbrücke	B-65
Belgien	
Berneau, Eisenbahnviadukt	103, A-75, B-120
Montigny-le-Tilleul, Candelier-Brücke	218, 219
Remersdaal, Eisenbahnviadukt	90, A-58, B-122
Sint-Martens-Voeren, Eisenbahnviadukt	B-121
Berlin	
Dovebrücke	186, A-139, A-153, B-97
Plötzensee, zwei Schiffskanal-Brücken	177–178
Wilmsdorf, Prinzregentenbrücke	209, 216, A-166, A-170, B-98
Blaibach	
Regenbrücke	216, A-171, B-5
Blaubeuren	
Stützbauwerk	B-38
Bornhöved	
Straßenbrücke	62, 100
Buhlen	
Talbrücke	A-87

Chemnitz	
Chemnitztalviadukt	115, 134, 190, 194, 202, 238, 243, A-149, B-68
Chemnitztalbahn	
Hartha, Chemnitzbrücke	B-66
Stein, Chemnitzbrücke	117, A-96, B-67
Dachau-Erdweg	
Fußgängerbrücke	B-6
Dresden	
Augustusbrücke	85, 91, 155, 202, A-49, A-94, A-158, B-69
Bischofsplatz	B-71
Eschenstraße	227, A-181, B-72
Marienbrücke	197, 200–202, 229–230, A-154, A-155, B-73
Potschappel, Weißeritzbrücke	13, 76, 228
Weißeritzbrücken	146, 154, 175, 240, A-109, A-194
Duisburg	
Karl-Lehr-Brücke	233
Düsseldorf	
Girardet-Brücke	209
Ebenhausen-Schäftlarn	
Alpenblickstraße	B-7
Ehingen a. d. Donau	
Bahnhofsbrücke	189
Donaubrücke Ehingen/Berg	106, 155, 189
Schmiechbrücke	116, 169, 189, 220, 229–230, A-92, A-142, B-39
Elsen	
Almebrücke	84, A-48
Erbach a. d. Donau	
Eschergraben	185
Westernachbrücke	37, 40, 135, 136, 137, 185, A-104–A-107, A-138
Erfurt	
Friedrichssteg	B-111
Hohenzollerbrücke	B-110
Krämpfertorbrücke	B-115
Pfortchenbrücke	B-112
Radowitzbrücke	B-114
Schlachthofbrücke	B-116
Straßenbrücke	B-117
Wilhelm-Steg	238, A-190, B-113
Esslingen	
Hammerkanalbrücke	136, 190, 223–230, 235, 259, A-176, A-179, A-180, A-182, B-40

ANHANG

Fischingen	
Neckarbrücke	188, 230
Flöha	
Flöhabrücke	B-76
Frankreich	
Albi, Pont Neuf	90, A-55, B-123
Albi, Pont Vieux	A-60
Amélie-les-Bains, Techbrücke	217, A-172
Avallon, Aquäduktbrücke	57–58, A-18
Cahors, Pont Valentré	91
Castelsarrasin, Bachbrücke	54, A-17
Créancey, Bachüberwölbung	51, 55, A-15
Cruseilles, Pont de la Caille	131, 259, A-102, B-125
Éguilly, Armançon-Brücke	52, 56, A-15
Gour Noir, Vézèrebrücke	B-127
Grenoble, Parkbrücke Vicat	57, A-19, B-128
Grisolles, Straßenbrücke	55–56, A-18
La Mure, Roizonnebrücke	B-133
Le Veudre, Allierbrücke	98, 219
Lothringen Moselbrücken in Sierck, Hauconcourt, Mallingen, Moulins, Sauvage	155, 196, 199, 202
Lyon, Pont de Tilsitt	147
Mantes, Seinebrücke	87–88
Montanges, Valserinebrücke	A-111
Montauban, Pont Neuf	217, A-173, A-174, B-132
Montauban, Pont Vieux	91
Montauban–Castres, Lavaur	B-129
Montauban–Castres, Pont Antoinette	B-130
Montauban–Castres, St. Waast	B-131
Montry, Dhuys-Aquädukt	58, A-20, B-126
Nemours, Loingbrücke	92
Neuville-sur-Saône, Pont Branla	181–182, A-134
Nogent-sur-Marne, Marnebrücke	87–88, 97
Paris, Kanal St. Martin	217
Paris, Pont d'Alma	96
Paris, Pont d'Austerlitz	96
Paris, Pont de Neuilly	86–88, 92, 145, A-50
Paris, Pont de Tolbiac	162, 178–179, 191
Paris, Pont des Invalides	96
Paris, Pont d'Iéna	86, 87, A-50
Paris, Pont-aux-Doubles	57, 64, 126, 153, 154, A-24, A-25, A-114
Pont de Cé, Loirebrücke	94
Pont-de-Claix, Pont de Claix	138, 146, 154, B-124
Prairéal-sur-Besbre	98, 218
Souillac, Dordognebrücke	16, 138

St-Paul-de-Damiate (Projekt)	53
Tours-Bordeaux, Eisenbahnbrücken	95
Vanne-Aquädukt	58-59, 62, 88, 237, A-21, A-51, A-188, B-134
Villemade, Dagraanbrücke	53-55, A-16, B-137
Villeneuve-sur-Lot, Lotbrücke	218, 258, A-70, B-138
Garching a. d. Alz mehrere Eisenbahnbrücken	113, 115, 190, 236, 238, 243, 259, A-90, A-144, A-185, A-186, A-189, B-8
Genthin Straßenbrücke	79, A-43
Glesse Glessebrücke	80, A-39, A-40, B-101
Liebold-Brücke	79, 80, A-40-A-42, B-100
Göhren Muldebrücke	13, 117, A-1, A-96, A-152, B-77
Göppingen Filsbrücke	B-41
Gosheim Heubergbahn, Schweinebrunnenviadukt	233, 243, B-43
Heubergbahn, Wettbachviadukt	210, 233, 243, A-131, A-167, B-45
Grasdorf Leinebrücke	112-117, 129, 133, 155-156, 171, 195, 206, 228, A-73, A-93, A-97, A-150, A-151, B-102
Großbritannien Hanwell, Wharncliffe Viaduct	150, A-111
Schottland, Firth of Forth-Brücke	7
Halden Lennebrücke	102, A-116
Hamburg St.-Annen-Brücke	97
Heidelberg Neckarbrücke	209, 213, A-165, A-168
Heselbach Murgbrücke	126, 144, 147, 174, B-42
Höfen a. d. Enz Enzbrücke	137, 166-167, 185-188, A-124
Hohnstein Eisenbahnbrücke	B-78
Holzminden Kanalüberwölbung	A-62

ANHANG

Inzigkofen	
Donaubrücke	100, 103, 117, 130, 132, 137, 143, 145, 156, 169, 170–173, 177–180, 206–207, 214, 216, 221, 224, 227–230, 235, 248, 257, A-97, A-124–A-126
Teufelsbrücke	B-46
Italien	
Forst, Etschbrücke	203
Morbegno, Addabrücke	153, 156, 203
Tarvis, Schlitza-Brücken	125, 203–208
Kanada	
Quebec, Brücke über den Lorenzstrom	7
Karlsruhe	
Werksbrücke Dyckerhoff	61
Kassel	
Fuldabrücke	A-87
Kempton	
Ahegg, Rottachbrücke	113, 243, A-196, B-10
Illerbrücken	83–85, 103, 106, 113–118, 124, 128–129, 133, 139, 145, 152–155, 173, 190, 201, 204, 208, 221, 223, 236, 238, 243, 245– 246, 250–253, A-47, A-76, A-115, A-129, A-191, A-203, B-9
Leubas, Straßenbrücke	B-11
Rothkreuz, Rottachbrücke	113, 184, 236, 238, 243, A-136, A-184, A-185, A-197, B-12
Kleinwolmsdorf	
Schwarze-Röder-Brücke	B-79
Köln	
Hohenzollernbrücke	233
Köpenick	
Lange Brücke und Dammbücke	100, 148, A-110
Landau a. d. Isar	
Bockerlbrücke	236, A-187, B-15
Langenbrand	
Emisau, Murgbrücke	238, A-190, B-48
Murgaquädukt	257, B-47
Viadukt über die Tennetschlucht	90, A-53, B-49
Langenhennersdorf	
Gottleubabrücke (Köpcke)	165–168, 177, 192, 194, A-121, B-80
Gottleubabrücke (Liebold)	165, B-81
zweite Gottleubabrücke (Köpcke)	165, A-122
Laupheim	
Kletterbrücke	233, B-50

Lautrach	
Illerbrücke	14, 74, 88, 113, 118, 129, 133, 139, 152, 155, 205–210, 221–223, 235, 238, 241, 246–253, A-204–A-216, B-16
Limbach-Oberfrohna	
Kändler, Pleißebachbrücke	198, A-156, B-82
Peniger Straße	B-84
Longuich	
Moselbrücke	105, 110, A-79
Lübars	
Projektierte Brücke	61
Lübeck	
Puppenbrücke	98
Luxemburg	
Luxemburg, Pont Adolphe	91, 107, A-61, A-86
Wasserbillig, Sauerbrücke	A-86
Mainz	
Rheinbrücke	257, 258
Mannheim	
Neckarbrücke	258
Marbach	
Murrbrücke	137
Mehring	
Moselbrücke	83, 105, 117, A-46, A-78, A-85, A-98, A-99
Meiningen	
Georgsbrücke	B-118
München	
Corneliusbrücke	88, 105, 204, 208, 211, 249, A-160, A-165, B-20
Gepsattelbrücke	240, B-24
Grünwald, Isarbrücke	204, 206, 251, A-161
Hackerbrücke Vorlandbrücke	183–184, 245, A-134, A-135, A-201, B-17
Isarbrücke Unterföhring	190, 238, A-145
Maximiliansbrücke	105, 172, 206–215, 251–252, A-128, A-159, B-21
Max-Joseph-Brücke	105, 216, B-23
Prinzregentenbrücke	105, 133, 172, 174, 207, 216, A-70, A-71, A-127, A-163, B-22
Reichenbachbrücke	105, 211, 239–240, A-191, B-19
Wittelsbacherbrücke	105, B-18
Munderkingen	
Donaubrücke	100, 107, 115–116, 125, 132, 136, 145, 155, 169–170, 173, 179–180, 203–208, 224–227, 257, A-103, A-159

ANHANG

Münster	
Hiltrup, Prinzbrücke	233
Neckarhausen	
Neckarbrücke	214
Nesselwang	
Wertachbrücke	233, 243, B-25
Neunburg vorm Wald	
Rötzerbachbrücke	B-26
Neuneck	
Glattbrücke	137
Neustadt-Hüfingen	
Gutachbrücke	148, 152
Schwändeholztobelbrücke	148, 152
Nossen	
Pöppelmannbrücke	B-85
Nürnberg	
Schniegling, Pegnitzbrücke	190, 238, 244–245, A-74, A-92, A-145, A-198–A-201, B-27
Vestnertorbrücke	62
Österreich	
Klösterle, Wäldlitobelbrücke	154, 156, A-116
Pinswang, Ulrichbrücke	B-139
Trisannabrücke	232, 233, A-183
Ottendorf	
Kocherbrücke	222
Owingen	
Eyachbrücke	194, 202, 245, A-148, A-204, B-51
Piesport	
Moselbrücke	105, A-80
Plauen	
Friedensbrücke	14, 83, 102, 115–116, 142, 156, 171, 184, 258, A-47, A-117, A-137, B-86
Polen	
Berlin–Stettin–Danzig, mehrere Brücken	60, A-22
Boberullersdorf, Boberbrücke	A-63
Porschendorf, Wesenitzbrücke	B-89
Rechtenstein	
Donaubrücke	101, 191, 224
Ried	
Eisenbahnbrücken	B-28
Rieden	
Eisenbahnbrücke	B-29
Rodewisch	
Göltzschbrücke	116, A-95, B-90

Rothenburg	
Neißebrücke	209
Rottweil	
Neufra, Primbrücke	236, B-53
Primalviadukt	B-52
Ruhrort	
Rheinbrücke	6
Salzwedel	
Straßenbrücke	79, A-43
Scharfenstein	
Zschopaubrücke	248, B-91
Schlema/Hartenstein	
Muldebrücke	102, 116, A-73, B-88
Schönbrunn	
Eisenbahnbrücke	B-93
Schweich	
Moselbrücke	105–106, 110, 117, A-78, A-98
Schweiz	
Chur–Arosa, Langwieser Viadukt	141, A-114
Davos–Filisur, Wiesener Viadukt	152, A-113
Erlisbach	56
Fribourg, Viaduc de Grandfey	90, A-54, B-141
Genf, Allondonbrücke	62
Genf, Pont de la Coulouvrenière	132, 179, 203, 205, 239, A-192, B-140
Herisau, Glattalviadukt	83, 90, A-59, B-142
Schaffhausen, Gerberbachüberwölbung	61, 100–101, A-23
Thusis–Filisur, Landwasserviadukt	90, 151, A-56, A-57
Thusis–Filisur, Solisbrücke	151, A-112
Vevey, Veveysebrücke	62
Zuoz, Innbrücke	179–180
Zürich, Stauffacherbrücke	171–172, 179, A-127, A-128, A-131, B-143
Seifersdorf	
Mühlgrabenbrücke	102, A-72, B-94
Weißeritzbrücke	B-95
Sigmaringen	
Donaubrücke	207, A-163, B-54
Slowenien	
Krainburg, Savebrücke	251, A-214
Salcano, Isonzobrücke	82, 140, 153
Stein, Pulverfabrik	27, 61, A-23
Spanien	
Brücke über den Iregua	62
Brücke über den Lavale	62

ANHANG

Staßfurt	
Bodebrücke	2, 80, 81, 241, A-45
Stuttgart	
Bad Cannstatt, Rosensteinbrücke	112, 129, 207, 214, 236, A-101, A-129, B-55
Brückenzug Ehmmanstraße	B-58
Nordbahnhofviadukt	B-57
Sulzbach	
Murrbrücke	B-59
Trittenheim	
Moselbrücke	105, 106, 110, A-79, A-80
Trostberg	
Alzbrücke	190, 245, A-131, A-143, A-202, B-30
Eisenbahnbrücke über den Alzkanal	B-31
Tübingen	
Neckarbrücke	206, 214, A-169
Ukraine	
Jaremcze, Pruth-Brücke	151
Ulm	
Wallstraßenbrücke	112, 155, 208, 213
USA	
Cabin John Aqueduct	142
Cleveland, Rocky River Bridge	107, 125
Los Angeles, Brooklyn Avenue Bridge	141
Philadelphia, Walnut Lane Bridge	92, 107, 140, 155, 156, 172, A-64, A-117
Valley	
Grub, Teufelsgrabenaquädukt	1, 114, 117, 241, A-91, B-32
Veckerhagen	
Hemelbachbrücke	80
Vieselbach	
Vieselbachbrücke	B-119
Vorwohle	
Lennebrücke	13, 75–81, 100–102, 235, 256, 259, A-35–A-37, B-104
Wäschenbeuren	
Eisenbahnbrücken	B-60
Welzheim–Rudersberg	
Wieslaufalbahn, Igelsbachviadukt	113, 142–143, 204–208, 214, A-161, A-162, B-63
Wieslaufalbahn, Laufenmühleviadukt	142–143, 208, 214, 251, A-164, B-61
Wieslaufalbahn, Strümpfelbachviadukt	142–143, 189, 208, A-85, A-131, A-141, B-62
Wilkau–Carlsfeld	
mehrere Brücken	B-96

Wittenberge	
Elbrücke	94
Wolfratshausen	
Gelting, Loisachkanalbrücken	239, A-193, B-33
Worms	
Rheinbrücke	255, 258

ABBILDUNGSNACHWEIS

Die Herkunftsnachweise der Abbildungen, die aus Druckwerken und Archivalien entnommen sind, sind direkt in der Bildunterschrift angegeben.

Die Fotografien, die nicht anderweitig nachgewiesen sind, entstanden in der gemeinsamen Forschungsarbeit, insbesondere bei gemeinsamen Forschungsreisen von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan M. Holzer sowie der Verfasserin selbst. Alle Fotografien von besprochenen Bauten sind von der Verfasserin selbst angefertigt, folgende Abbildungen wurden von Prof. Holzer angefertigt: 4.11, 4.18, 4.19, 4.21, 4.45, 4.47, 4.48, 4.53–4.56, 5.15, 5.21, 5.56, 5.84, 6.17, 6.24, 7.17, 7.19c, 7.30, 7.67, 8.4, 8.8, 8.13, 8.16, 8.22a, 8.23b, 8.33, 8.54 sowie folgende Fotografien im Katalog: B-9–B-11, B-98–B-102, B-127, B-135, B-138, B-142

Die Veröffentlichungs- und Vervielfältigungsrechte speziell der aus Archivalien entnommenen Abbildungen verbleiben bei den genannten Archiven.