

Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken

—

Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Universität der Bundeswehr München

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Stephan Engelhardt, M.Eng.

aus

Dietenbronn (Bay.)

Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken

–

Modulares Prozessmodell zur ökonomischen Optimierung von Straßentunneln

Stephan Engelhardt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Promotionsausschuss:

- | | |
|----------------------|--|
| Vorsitzender: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke
Universität der Bundeswehr München, |
| 1. Berichterstatter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz
Universität der Bundeswehr München, |
| 2. Berichterstatter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes
Ruhr-Universität Bochum |
| 3. Berichterstatter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser
Universität der Bundeswehr München |

Die Dissertation wurde am 03. April 2015 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 20. Mai 2015 angenommen.

Die mündliche Prüfung fand am 21. Mai 2015 statt.

Neubiberg, 27. Mai 2015

Meinem Großvater Xaver Engelhardt gewidmet

„Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist.“

Henry Ford (1863-1947)

Vorwort und Danksagung

Wie bei allen langfristigen Projekten, galt es auch bei der Anfertigung der vorliegenden Dissertation unzählige Höhen und Tiefen zu meistern. Mit der Fertigstellung dieser Arbeit ist es deshalb an der Zeit, den Menschen aufrichtig zu danken, die mich auf diesem Weg begleitet haben. Sie halfen mir in unterschiedlichster Weise, sie glaubten an mich und mein Projekt und ermutigten mich immer wieder dran zu bleiben. Sie hatten für meine Sorgen und Probleme immer ein offenes Ohr und mir – bewusst oder unbewusst – nützliche Hinweise und Anregungen für diese Arbeit geliefert. Für diese Unterstützung möchte ich mich ganz herzlich bedanken – auch bei allen, die in dieser Danksagung namentlich nicht erwähnt sind.

Ganz besonders gilt mein Dank Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz für die Betreuung in der Eigenschaft als 1. Berichterstatter. Ohne ihn wäre der Traum von der eigenständigen Anfertigung einer wissenschaftlichen Arbeit unerfüllt geblieben. Insbesondere für das entgegengebrachte Vertrauen und die mir eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume möchte ich mich bedanken. Dadurch war es mir möglich, mich aus wissenschaftlicher, aber auch persönlicher Sicht weiterzuentwickeln und den Forschungsprozess entsprechend meiner Stärken und Kompetenzen auszugestalten. Gleichzeitig stand er mir während meiner gesamten Zeit am Institut für Baubetrieb mit Rat und Tat zur Seite. Er vermittelte mir die notwendige wissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweise. Der für viele vielleicht unzeitgemäße Begriff „Doktorvater“ ist dank ihm moderner denn je.

Mein Dank gilt auch Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser für das Interesse an meiner Arbeit, für den fachlichen Rat und für ihre Anregungen in der Eigenschaft als Co-Berichterstatter. Durch die kritische Auseinandersetzung mit der Themenstellung und den aus den gemeinsamen Diskussionen hervorgehenden Ideen haben beide Betreuer diese Arbeit auf besondere Weise bereichert. Darüber hinaus profitierte ich von der engen Zusammenarbeit mit ihren Instituten.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke möchte ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie die Organisation und den reibungslosen Prüfungsablauf meinen besonderen Dank aussprechen. Zudem hatte er auch während der Erstellung der Arbeit stets ein offenes Ohr für Fragen.

Vielen Dank auch an alle aktuellen und ehemaligen Mitarbeiter des Instituts für Baubetrieb für das äußerst angenehme Arbeitsumfeld sowie ihre Diskussions- und Hilfsbereitschaft. Wesentlich war auch, dass für schlechte Zeiten immer genügend Süßigkeiten vorhanden waren. Ganz besonders danke ich dabei Herrn Hauptmann Dr.-Ing. Martin Lisson und meinem Zimmerkollegen M.Sc. Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Rainer Fauth, die beide durch zahllose – zum Teil sehr angeregte – Diskussionen immer wieder Erkenntnisse und Anstöße für das weitere Vorgehen lieferten. Aber auch allen Studentinnen und Studenten, die durch die Erstellung ihrer Bachelor- und Masterarbeiten einen wesentlich Beitrag zu dieser Arbeit geleistet haben, gilt mein ausdrücklicher Dank.

Mein Dank richtet sich auch an die Vertreter von Planern, Bauherren, Betreibern, Baufirmen und Herstellern von Tunnelausrüstung. Die Vielzahl an Gesprächen hat mir die Brisanz der Thematik verdeutlicht und wichtige Erkenntnisse für die Ausgestaltung des Modells geliefert.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Vogt danke ich für den sehr offenen wissenschaftlichen Austausch und die Unterstützung, besonders zu Beginn der Arbeit.

Herzlichen Dank auch an Herrn Dipl.-Ökonom Hans Adden von der Ruhr-Universität Bochum für seine Diskussionsbereitschaft, seine Anregungen und für das offene Ohr, wenn es einmal wieder nicht ganz so nach Plan lief sowie das Bierchen nach getaner Arbeit. Mein Respekt gebührt insbesondere der Muße, die er bei der Vermittlung von für Bauingenieure unwirklichen Themen rund um die Betriebswirtschaft an den Tag gelegt hat.

Für die Durchsicht und den grammatikalischen Feinschliff des Manuskriptes dieser Arbeit sowie den damit verbundenen Mühen danke ich Frau Manuela Bradler, Herrn Hauptmann Dr.-Ing. Martin Lisson sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Harald Schurz.

Ich danke auch den Herren Prof. Dipl.-Ing. Thomas Clausen und Prof. Dr.-Ing. Bernd Schweibenz als Geschäftsführer der PMS GmbH. Sie haben mir zu Beginn meiner wissenschaftlichen Arbeit die notwendigen beruflichen Freiräume eingeräumt, durch die ich die Chance ergreifen konnte, dieses Experiment neben meiner Anstellung als Projektingenieur anzugehen.

Herrn Dipl.-Ing. (FH) Hans Gran sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt. Er legte mit seinem Zuspruch hinsichtlich des Besuches einer höheren technischen Schule vor vielen Jahren den Grundstein für mein Bauingenieur-Dasein und damit letztlich auch für diese Arbeit. Er war es auch, der mir den Zugang zum Tunnelbau ermöglichte. Zusammen mit Herrn Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Walzik hat er mich über viele Jahre immer wieder gefordert und gefördert. Durch beide habe ich gelernt, Herausforderungen offen anzunehmen, mich mit vermeintlich unveränderlichen Dingen kritisch auseinanderzusetzen und auch mal neue, scheinbar unangenehme Wege zu beschreiten. Vielen Dank dafür.

Besonderer Dank gilt meinen Eltern Marianne und Xaver Engelhardt, die mir durch ihre Unterstützung, ihr Vertrauen und ihr Verständnis ermöglichten, den bisherigen Weg zu beschreiten. Das von ihnen vorgelebte Wertesystem half mir dabei, mich und meine Ziele zu verwirklichen.

Mein größter Dank gilt allerdings meiner Freundin und zukünftigen Ehefrau Sandra Schurz. Sie stand mir zu jedem Zeitpunkt aufrichtig und unterstützend zur Seite. Insbesondere danke ich ihr für das entgegengebrachte Verständnis hinsichtlich der vielen Entbehrungen während dieser Zeit, die sie mit unermesslicher Geduld und Energie ertragen und mich gleichzeitig immer wieder an das eigentliche Leben erinnert hat. Sie hat mir den Rücken freigehalten, hat aufkommende Zweifel beseitigt und mir immer wieder Mut zugesprochen. Der Abschluss der Promotion ist zum großen Teil auch ihr Verdienst und ich bringe ihr dafür meine allergrößte Bewunderung entgegen.

Kurzfassung

Die Entscheidung über den Bau, die Instandsetzung oder die Modernisierung von Tunnelbauwerken basiert in aller Regel auf den Investitionskosten. Dabei bleibt unberücksichtigt, dass zur Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit über die lange Lebensdauer von Tunnelbauwerken sehr ausgeprägte Folgekosten anfallen. Aus Sicht der Nachhaltigkeit gilt es deshalb, die gesamten Kosten im Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes transparent zu erfassen und gleichzeitig zu optimieren.

Das in vielen Bereichen bereits standardmäßig verwendete Konzept der Lebenszykluskostenrechnung liefert einen geeigneten Lösungsansatz und wird deshalb an die Spezifikationen von Tunnelbauwerken angepasst. Ausgehend von bereits existierenden Ansätzen wird zur Entwicklung einer ganzheitlichen Betrachtungsweise ein Lebenszykluskostenmodell entwickelt, das die Basis für eine gleichberechtigte Einbeziehung der Erst- und Folgekosten schafft.

Zur Umsetzung einer strukturierten und nachvollziehbaren Vorgehensweise bei der Bestimmung der Lebenszykluskosten wird eine hierarchische Strukturierung des Tunnelbauwerkes vorgenommen. Die weiteren Anforderungen hinsichtlich einer flexiblen Ausgestaltung sowie der Option zur aktiven Optimierung der Lebenszykluskosten setzen eine Erweiterung auf Basis einer Modularisierung voraus. Einzelne Module repräsentieren hierbei weitgehend unabhängige Einheiten. Für deren interne Struktur ist zur Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit ein allgemeingültiger Aufbau in Form von Attributen definiert. Gleichzeitig bedingt die Vielfältigkeit der Leistungen für die einzelnen Module eine Erfassung in übergeordneten Prozessen, zugeordnet zur jeweiligen Lebensphase. Das daraus resultierende Modulare Prozessmodell bildet das Kernelement zur Berechnung der Lebenszykluskosten und zur eigenständigen Generierung von Optimierungsansätzen.

Für die angestrebte transparente Bestimmung der Lebenszykluskosten wird auf Basis des Modularen Prozessmodells eine eigenständige Methodik entwickelt. Unter Berücksichtigung der internen und externen Schnittstellen sowie in Kenntnis der wesentlichen Einflussgrößen, wird dabei die gezielte Anpassung bzw. Substitution von Modulen, Prozessen oder Attributen für eine ganzheitliche ökonomische Optimierung umsetzbar.

Zur Berücksichtigung der aus der Kostenprognose resultierenden Unsicherheiten wird das Modulare Prozessmodell für die Implementierung probabilistischer Eingangsgrößen optional erweitert. Die Bestimmung der Lebenszykluskosten erfolgt dabei durch Integration einer Risikoanalyse in Form einer Monte-Carlo-Simulation.

Der Anwendungsrahmen der entwickelten Ansätze ist nicht allein auf die Planungsphase beschränkt. Vielmehr bildet das Modulare Prozessmodell – mit der darin hinterlegten konsistenten Kostenstruktur – die Ausgangsbasis für eine kontinuierliche Erfassung und Überprüfung über alle Lebensphasen hinweg. Es entsteht die Möglichkeit, durch Gegenüberstellung mit gleichartigen Bauwerken, Modulen bzw. Prozessen kontinuierlich Verbesserungsansätze zu generieren und Optimierungen umzusetzen. Hierfür wird zusätzlich das Konzept des Benchmarkings auf die vorliegende Zielstellung adaptiert und in einen eigenständigen Ablauf mit dem Modularen Prozessmodell als Kernelement integriert.

Die Funktionalität und Anwendbarkeit des Modulare Prozessmodells und der vorgestellten Methoden wird an einem Beispiel verifiziert. Dabei konnte sowohl die Flexibilität und Transparenz durch den modularen und prozessbezogenen Aufbau als auch die Möglichkeit zur Generierung von Optimierungsansätzen – auch unter Anwendung der Benchmarking-Methode – aufgezeigt werden. Es konnte dargelegt werden, dass mit den entwickelten Ansätzen eine transparente, von Zielstellung und Informationsdichte geprägte, ganzheitliche Erfassung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken möglich ist. Die Einbindung von Interdependenzen erlaubt die gezielte Optimierung von Modulen und Prozessen. Im Zusammenspiel der entwickelten Methoden und des darin eingebetteten Modulare Prozessmodells lässt sich die angestrebte ökonomisch optimierte Ausgestaltung von Tunnelbauwerken und dessen Betrieb über alle Phasen hinweg verwirklichen.

Abstract

For tunnel, it is customary to base the decision for a new construction, a rehabilitation or modernisation on the investment costs only. The very high follow-up costs caused by the requirements for safety, durability and availability are not taken into consideration. For the implementation of sustainability, the total costs of the life-cycle of a tunnel are to be captured in a transparent way. At the same time, it is important to optimise them.

The concept of life-cycle costing, the standard concept in many areas, provides a suitable approach and is adapted to the specifications of tunnels. For the implementation of a holistic approach, a life-cycle cost model is developed, which enables an equal inclusion of initial and follow-up costs.

In order to develop a clear and transparent approach for the determination of the life-cycle costs, the tunnel is structured hierarchically. To achieve the additional requirement of flexibility and the opportunity to generate optimisations of the life-cycle costs, the hierarchical structure has been extended by modularisation. Thereby modules represent largely independent units, which allow an entire representation of the object of investigation. In order to ensure comparability and transferability a general valid internal structure is defined in the form of attributes. Additionally the variety of the services of each module requires a classification in superior processes, assigned to the associated life-cycle phase. The resulting Modular-Process-Model forms the basis for the determination of the life-cycle costs and for the selective generation of optimisation approaches.

For a transparent determination of the life-cycle costs, a self-contained methodology has been developed, based on the Modular-Process-Model. Taking the internal and external interfaces into account, as well as the knowledge of relevant influence parameters enables a selective adjustment or substitution of modules, processes or attributes for a holistic economic optimisation.

The dependence on future conditions means that the data for a cost forecast are subject to uncertainties. For an integration of resulting risks the Modular-Process-Modell can optionally be extended by implementing probabilistic input parameters. The determination of the life-cycle costs is carried out by the integration of a risk analysis in an extended methodology using Monte-Carlo-Simulation.

The application of the developed approaches is not only limited to the design phase. The Modular-Process-Model, with its implemented consistent cost structure, forms the basis for a continuous capture and verification of the costs throughout all life-phases. The comparability with similar structures, modules or processes creates the possibility of a continuous generation of optimisation potentials. Therefore the concept of benchmarking was adapted to the objective and integrated in a self-contained approach.

The functionality and applicability of the Modular-Process-Model and the developed methods are verified by an exemplary tunnel. Besides, the flexibility and transparency could be demonstrated by the modular and process-related design as well as the possibility for the generation of optimisation attempts – also using the benchmarking method. It could be shown that the developed approaches allow a transparent, holistic capture of the life-cycle costs of tunnels, influenced by the objective and the available density of information. The integration of interdependencies enables the targeted optimisation of modules and processes. Due to the interaction of the developed methods and the embedded Modular-Process-Model, the targeted economically optimized design of tunnels can be realized.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis XI

Tabellenverzeichnis XV

Abkürzungsverzeichnis XVII

1 Einleitung..... 1

 1.1 Ausgangssituation 1

 1.2 Zielstellung 3

 1.3 Abgrenzung 4

 1.4 Vorgehensweise 5

2 Ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken..... 9

 2.1 Ökonomische Betrachtungen für Tunnelbauwerke in der Praxis 9

 2.1.1 Kostenplanung und ökonomische Bewertung im Zuge der Planung 10

 2.1.2 Leitfäden und Richtlinien zur Reduzierung der Kosten von Tunnelbauwerken 18

 2.1.3 Öffentlich-Private Partnerschaft – Public-Private Partnership 23

 2.1.4 Bewertung der praxisrelevanten Ansätze 25

 2.2 Ökonomische Betrachtungen für Tunnelbauwerke in der Forschung27

 2.2.1 Kostenplanung für die Errichtung von Tunnelbauwerken 28

 2.2.2 Wirtschaftlichkeit von Strecken der Eisenbahninfrastruktur 28

 2.2.3 Kosten-Risiko-Analyse für Verkehrsinfrastrukturprojekte 30

 2.2.4 Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken 31

 2.2.5 Lebenszykluskostenmodelle für Tunnelbauwerke 33

 2.2.6 Bewertung der bisherigen Forschungsansätze 42

 2.3 Erforderlicher Umfang ökonomischer Betrachtungen zur ganzheitlichen
 Kostenoptimierung43

3 Grundlagen der Lebenszykluskostenrechnung47

 3.1 Konzept der Lebenszykluskostenrechnung47

 3.1.1 Lebenszyklus 48

 3.1.2 Lebenszyklusphasen 49

 3.1.3 Lebenszykluskosten..... 52

 3.1.4 Lebenszykluskostenanalyse 55

 3.1.5 Grundlagen der Investitionsrechnung 56

 3.1.6 Kapitalwertmethode 60

3.2	Risikoanalyse bei Lebenszykluskostenrechnungen	61
3.2.1	Begriffe und Definitionen.....	62
3.2.2	Verfahren zur Berücksichtigung von Risiko	63
3.2.3	Beschreibung von Risiken durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen.....	66
3.2.4	Korrelation von Zufallsvariablen	67
3.2.5	Methoden zur Risikoaggregation	67
3.2.6	Bewertung der Ergebnisse einer Risikoanalyse	68
3.2.7	Datengrundlage für die Risikoanalyse	69
3.3	Monte-Carlo-Simulation	70
3.3.1	Einführung.....	70
3.3.2	Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation.....	71
3.4	Zusammenfassung der Grundlagen zur Lebenszykluskostenrechnung	73
4	Grundlagen des Benchmarking.....	75
4.1	Begriff, Definition und Historie.....	75
4.2	Funktion, Ziele und Nutzen	76
4.3	Arten des Benchmarking.....	77
4.4	Vorgehensweis und Methodik.....	78
5	Lebenszykluskostenmodell für Tunnelbauwerke.....	81
5.1	Anforderungen und Zielstellung	81
5.2	Grundlagen der Modellentwicklung.....	81
5.3	Entwicklung einer hierarchisch-modularen Modellstruktur.....	83
5.3.1	Hierarchische Strukturierung	83
5.3.2	Hierarchisch-modulare Strukturierung	86
6	Modulares Prozessmodell	89
6.1	Hierarchisch-modulare Strukturierung der Kosten von Straßentunneln.....	89
6.1.1	Strukturebene 1: Bauwerksebene	89
6.1.2	Strukturebene 2: Systemebene	90
6.1.3	Strukturebene 3: Baugruppe.....	91
6.1.4	Strukturebene 4: Modulebene.....	92
6.1.5	Strukturebene 5: Elementebene	93
6.2	Module von Tunnelbauwerken.....	94
6.2.1	Vorgehensweise zur Bestimmung von Modulen.....	95
6.2.2	Beispielhafte Systemausgestaltung für das Modulare Prozessmodell	98
6.2.3	Modulaufbau (Grundmodul)	99

6.3	Definition der Prozesse über den Lebenszyklus.....	104
6.3.1	Herstellungsphase	105
6.3.2	Nutzungsphase	106
6.3.3	Verwertungsphase	112
6.4	Kostenstruktur	114
6.5	Schnittstellenmatrix.....	116
6.6	Modulares Prozessmodell.....	117
6.7	Anwendungsspektrum des Modulare Prozessmodells	118
7	Methodik zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten.....	121
7.1	Bestimmung des Untersuchungsrahmens.....	122
7.2	Ausgestaltung des Modulare Prozessmodells.....	122
7.3	Berechnung der Lebenszykluskosten	123
7.4	Sensitivitätsanalyse	127
7.5	Identifikation von Substitutionspotentialen und ökonomische Optimierung.....	128
7.6	Feststellung der Lebenszykluskosten	131
8	Modellerweiterung zur Berücksichtigung probabilistischer Eingangsgrößen.....	133
8.1	Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Lebenszykluskostenrechnung	133
8.2	Unsichere Größen im Modulare Prozessmodell	134
8.3	Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten	136
8.3.1	Grundlagenbildung auf Basis deterministischer Attributsaupprägung	136
8.3.2	Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der signifikanten Einflussparameter	137
8.3.3	Evaluation der Wahrscheinlichkeitsverteilung unsicherer Eingangsgrößen	137
8.3.4	Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung der Lebenszykluskosten auf Basis probabilistischer Eingangsgrößen	137
8.3.5	Identifikation von Substitutionspotentialen und ökonomische Optimierung	138
8.3.6	Bewertung und Feststellung der Lebenszykluskosten	138
9	Kontinuierliche Optimierung der Lebenszykluskosten	141
9.1	Benchmarking-Konzept für Tunnelbauwerke	141
9.1.1	Bestimmung des Analysegegenstands.....	142
9.1.2	Datenerfassung.....	143
9.1.3	Datenaufbereitung	143
9.1.4	Kennzahlenbildung	144
9.1.5	Vergleich von Kennzahlen	145
9.1.6	Ergebnisanalyse und Erfassung von Optimierungspotentialen	146
9.1.7	Optimierung.....	146
9.2	Bestimmung von Kennzahlen zur kontinuierlichen Optimierung.....	147

10 Applikation zur Verifizierung von Modell und Methodik	149
10.1 Projektbeschreibung	149
10.2 Deterministische Projektuntersuchung	152
10.2.1 Untersuchungsrahmen.....	152
10.2.2 Ausgestaltung des Untersuchungsgegenstandes	152
10.2.3 Berechnung der Lebenszykluskosten.....	160
10.2.4 Identifikation von Optimierungsansätzen.....	169
10.2.5 Untersuchung und Bewertung von Optimierungsansätzen	173
10.2.6 Feststellung der Lebenszykluskosten.....	183
10.3 Einbeziehung probabilistischer Größen zur Entscheidungsfindung	183
10.3.1 Sensitivitätsanalyse	184
10.3.2 Evaluation der probabilistischen Eingangsgrößen.....	185
10.3.3 Bestimmung der Lebenszykluskosten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation	187
10.3.4 Bewertung der Ergebnisse der Risikoanalyse	189
10.3.5 Abschätzung der Relevanz von finanzwirtschaftlichen Eingangsgrößen	191
10.4 Umsetzung der kontinuierlichen Optimierung.....	192
10.4.1 Analysegegenstand	193
10.4.2 Datenerhebung	194
10.4.3 Datenaufbereitung	196
10.4.4 Kennzahlenbildung	199
10.4.5 Vergleich der Kennzahlen.....	200
10.4.6 Analyse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen	201
10.4.7 Umsetzung der Optimierung.....	205
11 Schlussbetrachtung	207
11.1 Zusammenfassung	207
11.2 Prüfung der geforderten Kriterien für Modell und Methodik	211
11.3 Ausblick	212
Literaturverzeichnis	215
Anhang	245

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Einflussfaktoren auf die Kosten von Tunnelbauwerken	21
Abbildung 2.2:	Phasen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zur Umsetzung von PPP-Projekten.....	24
Abbildung 2.3:	Kosten-Risiko-Matrix	30
Abbildung 2.4:	Aufbau des Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur.....	32
Abbildung 2.5:	Darstellung der Modellzusammenhänge	34
Abbildung 2.6:	Ablaufschema zur Bestimmung der Kosten für die Zeit-Kosten-Matrix	40
Abbildung 3.1:	Lebenszyklusphasen im FM (zyklische Darstellung).....	48
Abbildung 3.2:	Überlagerung der Leistungsphasen der HOAI mit den Lebenszyklusphasen.....	51
Abbildung 3.3:	Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerkes.....	52
Abbildung 3.4:	Differenzierung der Kostenbegriffe	53
Abbildung 3.5:	Bestandteile von WLC und LCC	54
Abbildung 3.6:	Ziel der Lebenszykluskostenanalyse	56
Abbildung 3.7:	Verfahren der Investitionsrechnung bei Einzelinvestitionen	57
Abbildung 3.8:	Wertigkeit identischer Zahlungen mit unterschiedlichem Anfallszeitpunkt	58
Abbildung 3.9:	Abzinsung der einzelnen Nettozahlungen zur Bildung des Kapitalwertes KW_0	60
Abbildung 3.10:	Differenzierung von Sicherheit, Risiko und Ungewissheit und Unwissen .	62
Abbildung 3.11:	Darstellung der Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse	64
Abbildung 3.12:	Verteilungsfunktionen des Kapitalwertes von zwei Investitionsalternativen	68
Abbildung 3.13:	Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation	72
Abbildung 4.1:	Fünf-Phasen-Ablaufmodell des Benchmarking	79
Abbildung 5.1:	Zielkonflikt der Modelltheorie	82
Abbildung 5.2:	Einordnung des Lebenszykluskostenmodells hinsichtlich Modell- bzw. Systemtheorie	83
Abbildung 5.3:	Hierarchische Dekomposition auf Basis der Systemtheorie	84
Abbildung 5.4:	Systemarchitektur – Visualisierung.....	85
Abbildung 5.5:	Abbildungsmöglichkeiten bei einer rein hierarchischen Modellierung	85
Abbildung 5.6:	Flexible Abbildung des Untersuchungsumfangs bzw. -gegenstands bei einer hierarchisch-modularen Strukturierung	87
Abbildung 6.1:	Einteilung von Erst- und Folgekosten von Tunnelbauwerken	89
Abbildung 6.2:	Qualitative Verteilung der Erst- und Folgekosten von Tunnelbauwerken .	90
Abbildung 6.3:	Strukturebene 2 – Systemebene	91
Abbildung 6.4:	Strukturebene 3 – Baugruppenebene.....	91
Abbildung 6.5:	Strukturebene 4 – Modulebene	93
Abbildung 6.6:	Strukturebene 5 – Elementebene	94
Abbildung 6.7:	Modulare Struktur für die Lebenszykluskostenrechnung von Tunnelbauwerken.....	94

Abbildung 6.8:	Vorgehensweise zur Bestimmung von Modulen	95
Abbildung 6.9:	Schematischer Leuchtdichteverlauf für Straßentunnel.....	96
Abbildung 6.10:	Exemplarische Strukturierung und Moduleinteilung für Straßentunnel.....	99
Abbildung 6.11:	Interne Struktur eines Moduls.....	99
Abbildung 6.12:	Zuordnung Element – Modul mit Hilfe der technisch-funktionalen Aufgabe.....	100
Abbildung 6.13:	Identifikation der Prozesse im Lebenszyklus eines Moduls	101
Abbildung 6.14:	Prozesse während der Lebensphasen von Tunnelbauwerken.....	105
Abbildung 6.15:	Instandhaltungsstrategien – präventiv, zustandsorientiert und korrektiv	108
Abbildung 6.16:	Inspektionen gemäß DIN 1076 und RABT 2006.....	110
Abbildung 6.17:	Kostenmatrix (beispielhafte Ausgestaltung).....	115
Abbildung 6.18:	Schnittstellenmatrix (beispielhafte Ausgestaltung).....	116
Abbildung 6.19:	Das Modulare Prozessmodell (beispielhafte Ausgestaltung)	117
Abbildung 6.20:	Flexible Ausgestaltung als Vorteil der modularen Strukturierung	118
Abbildung 6.21:	Anwendungsspektrum des Modularen Prozessmodells.....	119
Abbildung 7.1:	Methodik zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken	121
Abbildung 7.2:	Abgrenzung des Untersuchungsrahmens.....	122
Abbildung 7.3:	Berücksichtigung zeitlicher Gewichtung von Kosten durch Auf- bzw. Abzinsung auf den Betrachtungszeitpunkt	124
Abbildung 7.4:	Modul-, baugruppen- oder systembezogene Aggregation der Kosten ...	125
Abbildung 7.5:	Prozessbezogene Aggregation der Kosten	126
Abbildung 7.6:	Phasenbezogene Aggregation der Kosten	127
Abbildung 7.7:	Rangfolgebildung zur Identifikation signifikanter Kostengrößen.....	127
Abbildung 7.8:	Darstellung der Sensitivität des Kapitalwertes	128
Abbildung 7.9:	Aufzeigen der betroffenen Module (grün bzw. blau) infolge der Änderung eines Moduls (rot) unter Berücksichtigung der Schnittstellen	129
Abbildung 7.10:	Grundsätzliche Möglichkeiten der Substitution	130
Abbildung 7.11:	Verlauf der Lebenszykluskosten (beispielhafte Darstellung)	131
Abbildung 8.1:	Methodik zur Bestimmung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung probabilistischer Eingangsgrößen	136
Abbildung 8.2:	Vorgehensweise bei einer Monte-Carlo-Simulation zur Lebenszykluskostenrechnung	138
Abbildung 8.3:	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von zwei Varianten zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit.....	139
Abbildung 9.1:	Benchmarking-Konzept für Tunnelbauwerke	142
Abbildung 9.2:	Netzdiagramm für Kennzahlenvergleich	145
Abbildung 9.3:	Visualisierung der Anteile der Einflussfaktoren an der Leistungslücke...	146
Abbildung 10.1:	Regelquerschnitt Mustertunnel	150
Abbildung 10.2:	Übersichtslageplan Mustertunnel	151
Abbildung 10.3:	Ausbildung des Modularen Prozessmodells (auszugsweise).....	153

Abbildung 10.4:	Zeitliche Veränderung der relevanten Preisindizes inkl. eines Mittelwertes und einer linearen Trendlinie.....	160
Abbildung 10.5:	Verlauf der Lebenszykluskosten des Mustertunnels unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.....	163
Abbildung 10.6:	Gegenüberstellung des Verlaufs der Lebenszykluskosten mit und ohne Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes	168
Abbildung 10.7:	Auswertung der Sensitivität der Lebenszykluskosten [in %]	171
Abbildung 10.8:	Auswertung der Sensitivität der Lebenszykluskosten bezogen auf die Lebenszykluskosten des jeweiligen Moduls [in %].....	172
Abbildung 10.9:	Auslösendes Modul (rot) und betroffene Module (grün) aus dem Untersuchungsrahmen – Variante 1.....	174
Abbildung 10.10:	Visualisierung der Energieeinsparung aus Reinigung.....	175
Abbildung 10.11:	Gegenüberstellung des Verlaufs der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit zus. Tunnelreinigung	176
Abbildung 10.12:	Auslösendes Modul Beschichtung (rot) und betroffene Module (grün) aus dem Untersuchungsrahmen – Variante 2.....	177
Abbildung 10.13:	Gegenüberstellung des Verlaufs der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung.....	182
Abbildung 10.14:	Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der maßgeblichen Einflussgrößen für die Variante mit Beschichtung.....	185
Abbildung 10.15:	Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Lebenszyklus- kosten von Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung.....	188
Abbildung 10.16:	Grenzwertverläufe (min. und max.) der Lebenszykluskosten für die Ausgangsvariante und die Variante mit Beschichtung	189
Abbildung 10.17:	Gegenüberstellung der Verteilungsfunktion der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung.....	190
Abbildung 10.18:	Gegenüberstellung der Verteilungsfunktion der Lebenszykluskosten	191
Abbildung 10.19:	Differenzen der Kennzahlen Mustertunnel – Vergleichstunnel.....	201
Abbildung 10.20:	Verlauf der Lebenszykluskosten aller Varianten	204

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Verfahrensebenen bei Planung und Bau von Verkehrswegeprojekten	10
Tabelle 2.2:	Mittlere Kostenstruktur von Straßenprojekten zur Berechnung der einzelnen Anlageinvestitionen bei Angabe der Gesamtkosten	12
Tabelle 2.3:	Theoretische Nutzungsdauer (m) und Prozentsätze (p) der jährlichen Unterhaltskosten	17
Tabelle 2.4:	Bewertung der ökonomischen Betrachtungen in der Praxis.....	27
Tabelle 2.5:	Betriebs- und Unterhaltskosten in Abhängigkeit vom Bauwerksalter	36
Tabelle 2.6:	Bewertung der ökonomischen Betrachtungen in der Forschung.....	42
Tabelle 6.1:	Zuweisung Aufgaben und Baugruppen.....	92
Tabelle 9.1:	Kennzahlen und Bezugsgrößen für Tunnelbauwerke	148
Tabelle 10.1:	Zusammenstellung Parameter Mustertunnel	150
Tabelle 10.2:	Untersuchungsrahmen Mustertunnel.....	152
Tabelle 10.3:	Kostenstruktur für das 31. Betriebsjahr – 2044 (1. Instandsetzung Gewölbe).....	153
Tabelle 10.4:	Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Gewölbe“	154
Tabelle 10.5:	Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Sohle“	155
Tabelle 10.6:	Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“	156
Tabelle 10.7:	Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Innenbeleuchtung“	157
Tabelle 10.8:	Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Lüftungsanlage“	158
Tabelle 10.9:	Schnittstellenmatrix Mustertunnel.....	159
Tabelle 10.10:	Zusammenstellung Lebenszykluskosten des Mustertunnels unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.....	161
Tabelle 10.11:	Modulweise Zuordnung der Lebenszykluskosten des Mustertunnels unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.....	161
Tabelle 10.12:	Zusammenstellung der Einzelanteile der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.....	162
Tabelle 10.13:	Bewertung der Erst- und Folgekosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.....	164
Tabelle 10.14:	Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung unterschiedlicher Kalkulationszinssätze	165
Tabelle 10.15:	Prozessweise Zuordnung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.....	166
Tabelle 10.16:	Prozessweise Zuordnung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 0,0 %.....	166
Tabelle 10.17:	Bewertung der Erst- und Folgekosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 0,0 %.....	167
Tabelle 10.18:	Rangfolgebildung der Kostenbestandteile der Lebenszykluskosten.....	169
Tabelle 10.19:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten bezogen auf die Lebenszykluskosten des Untersuchungsrahmens.....	171
Tabelle 10.20:	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten bezogen auf die Lebenszykluskosten des jeweiligen Moduls.....	172

Tabelle 10.21: Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit zus. Reinigung.....	176
Tabelle 10.22: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Beschichtung“	178
Tabelle 10.23: Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung des Gewölbes	181
Tabelle 10.24: Übersicht der Lebenszykluskosten aller untersuchten Varianten	183
Tabelle 10.25: Rangfolgebildung zur Identifikation der Kostentreiber.....	184
Tabelle 10.26: Beispielhafte Verteilungsfunktionen unsicherer Eingangsgrößen	187
Tabelle 10.27: Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse der Risikoanalyse	188
Tabelle 10.28: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Risikoanalyse.....	189
Tabelle 10.29: Verteilungsfunktionen der veränderlichen Eingangsgrößen.....	191
Tabelle 10.30: Ergebnisse der Risikoanalyse hinsichtlich finanzmathematischer Größen.	192
Tabelle 10.31: Gegenüberstellung Parameter Mustertunnel - Vergleichstunnel	193
Tabelle 10.32: Datenerhebung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Mustertunnel.....	194
Tabelle 10.33: Datenerhebung Versorgung Beleuchtung Mustertunnel	194
Tabelle 10.34: Datenerhebung Reinigung Beleuchtung Mustertunnel.....	194
Tabelle 10.35: Datenerhebung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Vergleichstunnel....	195
Tabelle 10.36: Datenerhebung Versorgung Beleuchtung Vergleichstunnel.....	195
Tabelle 10.37: Datenerhebung Reinigung Beleuchtung Vergleichstunnel	195
Tabelle 10.38: Datenbereinigung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Mustertunnel	196
Tabelle 10.39: Datenbereinigung Reinigung Einfahrtsbeleuchtung Mustertunnel.....	196
Tabelle 10.40: Datenbereinigung Reinigung Innenbeleuchtung Mustertunnel.....	196
Tabelle 10.41: Datenbereinigung Energieversorgung Einfahrtsbeleuchtung Mustertunnel	197
Tabelle 10.42: Datenbereinigung Energieversorgung Innenbeleuchtung Mustertunnel.....	197
Tabelle 10.43: Datenbereinigung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Vergleichstunnel	197
Tabelle 10.44: Datenbereinigung Reinigung Einfahrtsbeleuchtung Vergleichstunnel.....	198
Tabelle 10.45: Datenbereinigung Reinigung Innenbeleuchtung Vergleichstunnel	198
Tabelle 10.46: Datenbereinigung Energiekosten Einfahrtsbeleuchtung Vergleichstunnel .	199
Tabelle 10.47: Datenbereinigung Energiekosten Innenbeleuchtung Vergleichstunnel	199
Tabelle 10.48: Kennzahlen Mustertunnel.....	200
Tabelle 10.49: Kennzahlen Vergleichstunnel	200
Tabelle 10.50: Gegenüberstellung der Kennzahlen	200
Tabelle 10.51: Zusammenstellung der Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnungen ..	204

Abkürzungsverzeichnis

A	ABBV	Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung
	agO	außerhalb geschlossener Ortschaften
	AHP	Analytisch Hierarchischer Prozess
	AKS	Anweisung zur Kostenberechnung für Straßenbaumaßnahmen
	ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
	ASTRA	Bundesamt für Straßen (Schweiz)
B	BAB	Bundesautobahn
	BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
	BayBO	Bayerische Bauordnung
	BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
	BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
	BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift
	BHO	Bundeshaushaltsordnung
	BKI	Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH
	BMF	Bundesministerium der Finanzen
	BMJV	Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz
	BMS	Bauwerks-Management-System
	BMV	Bundesministerium für Verkehr (bis 1998)
	BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2005 bis 2013)
	BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (1998 bis 2005)
	BOT	Build Operate Transfer (Betreibermodell)
	BPPP	Bundesverband Public Private Partnership
	BRH	Bundesrechnungshof
	bspw.	beispielsweise
	BSt	Betonstahl
	BVWP	Bundesverkehrswegeplan
	BWL	Betriebswirtschaftslehre
	bzgl.	bezüglich
	bzw.	beziehungsweise
C	cd	Candela (Maßeinheit für die Lichtstärke)
	CIE	Commission internationale de l'éclairage (Internationale Beleuchtungskommission)
	CO	Kohlenmonoxid
D	DIN	Deutsche Norm
	DTV	Durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke
E	E(X)	Erwartungswert
	EN	Europäische Norm
	engl.	englisch
	EVG	Elektronisches Vorschaltgerät
	EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen
F	FDIS	Final Draft International Standard
	FF	Flimmerfrequenz
	FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
	FM	Facility Management
	FMK	Finanzministerkonferenz
	FStrG	Bundesfernstraßengesetz

G	GEFMA	German Facility Management Association
	GSB	Gegenstrahlbeleuchtung
H	HK	Herstellkosten
	HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen
	Hrsg.	Herausgeber
	HST	Natriumdampf-Hochdrucklampen
	HSV	Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung
	HVA F-StB	Handbuch für Vergabe und Ausführung von freiberuflichen Leistungen im Straßen- und Brückenbau
I	igO	innerhalb geschlossener Ortschaften
	IP	International Protection Codes (Schutzart)
	ISO	International Organization for Standardization (Internationale Norm)
	IT	Informationstechnik
	IUT	Innovationen unter Tage (Fachmesse für Untertage- und Tunnelbau)
K	KBK	Kostenberechnungskatalog
	KLR Bau	Kosten- und Leistungsrechnung der Bauunternehmen
	KORA	Modell zur Kosten-Risiko-Analyse
	KVG	Konventionelles Vorschaltgerät
	kW	Kilowatt (Maßeinheit für Leistung)
	KW	Kapitalwert
L	LCC	Life-Cycle Cost (Lebenszykluskosten) bzw. Life-Cycle Costing (Lebenszykluskostenrechnung)
	LCCA	Life-Cycle Cost Analysis (Lebenszykluskostenanalyse)
	LED	Licht-emittierende Diode
	LLMF	Lampenlichtstromwartungsfaktor (Lamp Lumen Maintenance Factor)
	LMF	Leuchtenwartungsfaktor (Luminaire Maintenance Factor)
	Lph	Leistungsphase
	LSF	Lampenlebensdauerfaktor (Lamp Survival Factor)
	lx	Lux (Maßeinheit für Beleuchtungsstärke)
	LZK	Lebenszykluskosten
M	M(X)	Median
	MCS	Monte-Carlo-Simulation
	MF	Wartungsfaktor (Maintenance Factor)
	M KWPT	Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln
	Mod(X)	Modus / Modalwert
	MTBF	Mean Time Between Failure (Mittelwert der Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen)
	MTTF	Mean Time To Failure (Mittelwert der Betriebsdauer bis zum Ausfall)
	MTRR	Mean Time To Repair (Mittelwert der Reparaturdauer)
N	NHN	Normalhöhennull
	NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
	NKV	Nutzen-Kosten-Verhältnis
	NO _x	Stickoxide
	NPV	Net Present Value (Kapitalwertmethode)
O	ÖBV	Österreichische Bautechnik Vereinigung
	ÖNORM	Österreichische Norm
	ÖPP	Öffentlich Private Partnerschaft (vgl. PPP)
	OSA	Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (Bestandteil der RI-ERH-ING)
	OTLCC	Operational Tunnel Life-Cycle Costs

P	PAS	Publicly Available Specification (Öffentlich verfügbare Spezifikation)	
	PIARC	World Road Association	
	PLaPB	Technisches Planungshandbuch der ASFiNAG	
	PPP	Public Private Partnership (vgl. ÖPP)	
	PRIMO	Projektbezogenes Risiko-Modell	
	PSC	Public Sector Comparator	
	PTLCC	Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs	
R	RAB-ING	Richtlinie für das Aufstellen von Ingenieurbauten	
	RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln	
	RBBau	Richtlinien für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes	
	RI-BWD-TU	Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln	
	RI-ERH-ING	Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken	
	RiL	Richtlinie (Deutsche Bahn)	
	RQ	Regelquerschnitt	
	RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (Österreich)	
	RWA	Raumwirksamkeitsanalysen	
	RWVA	Richtlinien für Wechselverkehrszeichenanlagen an Bundesfernstraßen	
	RWVZ	Richtlinien für Wechselverkehrszeichen an Bundesfernstraßen	
	S	SB	Symmetrische Beleuchtung
		SMF	Oberflächenwartungsfaktor (Surface Maintenance Factor)
STLB-Bau		Standardleistungsbuch für Bauleistungen	
STLK		Standardleistungskatalog	
STMI		Bayerisches Staatsministerium des Inneren, Bau und Verkehr	
STUVA		Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.	
SVGW		Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches	
T	TMS	Tunnel-Management-System	
	TRBS	Technische Regeln für Betriebssicherheit	
U	UN	United Nations (Vereinte Nationen)	
	URE	Umweltrisikoeinschätzungen	
	USV	Unabhängige Stromversorgung	
V	Var	Varianz	
	VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.	
	VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.	
	VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen	
	VoFi	Vollständiger Finanzplan	
	VSA	Verband für Gewässer und Abwasser	
	VWL	Volkswirtschaftslehre	
	VVG	Verlustarmes Vorschaltgerät	
W	W	Watt (Maßeinheit für Leistung)	
	WECD	World Commission on Environment and Development	
	WLC	Whole Life Cycle Cost (Lebenszykluskosten)	
	WTC	World Tunnel Congress	
Z	ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten	

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Tunnelbauwerke sind wesentlicher Bestandteil unserer modernen Infrastruktur. Sie bilden die Grundvoraussetzung, die wachsenden Ansprüche an Mobilität und Umweltschutz, aber auch an Sicherheit, überhaupt erfüllen zu können. Sie ermöglichen eine Verkürzung von Reisezeiten, tragen dazu bei, Unfallschwerpunkte aufzulösen und führen zu einem örtlichen Schutz vor Immissionen (Lärm, Schadstoffen usw.).¹ Die stetig steigenden Verkehrsströme sowie die Konzentration der Bevölkerung auf wenige Metropolen und die damit verbundenen beengten Platzverhältnisse in den Städten bedingen eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit unserer Verkehrsinfrastruktur. Der Bedarf an neuen Tunnelbauwerken wird auch zukünftig hoch sein.²

Wie VOGT aufzeigt, ist neben dem Neubau ein erhöhter Sanierungs- bzw. Modernisierungsbedarf, insbesondere hinsichtlich der Betriebstechnik und bedingt durch die Altersstruktur der deutschen Straßentunnel, zu erkennen.³ Hier kommt hinzu, dass durch die steigenden sicherheitstechnischen Anforderungen (z. B. durch Erweiterung der RABT⁴), ein weiterer Ausbau der Betriebstechnik in Tunnelbauwerken notwendig sein wird. Von Seiten der Baulastträger wurden und werden zur Umsetzung der erhöhten Anforderungen sowohl für den Neubau als auch für die Nachrüstung von Tunnelbauwerken *„(...) erhebliche Finanzmittel investiert, um (...) ein sehr hohes Sicherheitsniveau für die Bauwerke und deren Nutzer zu gewährleisten.“*⁵

Mit der Zunahme an Betriebstechnik geht letztlich eine Steigerung der Kosten für den Betrieb und Unterhalt der Tunnelbauwerke einher. Die Relevanz der sogenannten Folgekosten, bedingt auch durch die sehr langen Nutzungsdauern von rund 100 Jahren, nimmt damit immer weiter zu.⁶ Bereits 1951 stellte NAUMANN hinsichtlich der durch Tunnelbauwerke verursachten Gesamtkosten fest:

*„Tunnel werden wegen ihrer hohen Bau- und Betriebskosten nur dann angebracht sein, wenn die Straße einen bedeutenden Verkehr hat, (...) weil nur dann die Ersparnisse an Fahrzeit und Betriebsstoff die einmaligen Aufwendungen und auch die hohen Betriebskosten wieder einbringen.“*⁷

Für den Entscheidungsprozess bedeutet dies, dass es unerlässlich ist, die Erst- und Folgekosten gleichwertig einzubinden. Ziel muss es sein, die Variante mit den geringsten Kosten über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes umzusetzen.⁸ Wie Untersuchungen allerdings zeigen, ist es bislang üblich, Investitionsentscheidungen für den Bau bzw. die Sanierung von Infrastrukturbauwerken einzig auf die Herstellkosten zu begründen. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, die eine Einbeziehung der Folgekosten explizit vorsehen, finden trotz gesetzlicher Forderung und dem Zwang zum wirtschaftlichen Handeln nur sehr rudimentär Anwendung.⁹

¹ vgl. BALTZER (2012), S. 175

² vgl. KEFER (2013), S. 17

³ vgl. VOGT (2012), S. 21 f.

⁴ Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) [vgl. FGSV (2006)]

⁵ BAST (2011), S. 1

⁶ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 244; THEWES, VOGT (2014), S. 421

⁷ NAUMANN, OTZEN (1951), S. 414

⁸ Eine entsprechende Forderung ist bereits unter § 7 (BHO) formuliert. [vgl. BMF (2013)A, § 7]

⁹ vgl. BRH (2007), S. 125 ff.

Erschwerend kommt hinzu, dass ein zeitliches Vorziehen zukünftiger Haushaltsausgaben, beispielsweise um durch eine gezielte Erhöhung der Investitionskosten Folgekosten einzusparen und damit eine Optimierung der Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerkes zu erzielen, den öffentlichen Haushaltsvorschriften entgegensteht.¹⁰ Die kurzfristige, bedarfsorientierte Budgetplanung der Kameralistik der öffentlichen Verwaltung hemmt die notwendige lebensphasenübergreifende Denkweise bei der Planung und dem Betrieb von Tunnelbauwerken.¹¹

Wie der Bundesrechnungshof (BRH) hierzu feststellt, fehlt es an ausreichend entwickelten Systemen, die eine Kosten- und Leistungsrechnung der öffentlichen Verwaltung ermöglichen könnten. Eine strukturierte, konsistente Erfassung tatsächlich anfallender Kosten, insbesondere während der Nutzungsphase, findet somit kaum statt.¹² Die notwendige konsequente Auseinandersetzung mit den Kosten und den damit verbundenen Prozessen – über die Herstellungsphase hinaus – ist nicht zu erkennen. Letztlich ist ein Bewusstsein für die Elemente, die Prozesse und die dadurch verursachten Kosten sowie den wesentlichen Interdependenzen nicht bzw. nur fachbezogen vorhanden. Zur gezielten Kostenoptimierung ist es allerdings unerlässlich, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Einflussgrößen fachübergreifend zu erfassen. Anders können Ansätze für eine systematische, ganzheitliche Optimierung von Tunnelbauwerken hinsichtlich deren Lebenszykluskosten nicht generiert werden.¹³ Darüber hinaus ist in Ermangelung einheitlicher (Kosten-) Strukturen eine Vergleichbarkeit von Tunnelbauwerken bzw. einzelner Kostenelemente nicht gegeben. Eine kontinuierliche Verbesserung, wie dies beispielsweise durch Benchmarking angestrebt wird, kann bislang nicht realisiert werden. Substitutions- und Optimierungspotentiale bleiben ungenutzt.

Im Bereich der Immobilienwirtschaft sind die ganzheitliche Betrachtung und eine darauf ausgerichtete Optimierung der Lebenszykluskosten standardmäßig implementiert. Von Seiten der Wissenschaft – aber auch aus der Praxis heraus – wurden hierzu bereits eine Vielzahl an Modellen vorgestellt, beispielsweise die Modelle von RIEGEL (2004), HERZOG (2005), PELZETER (2006), KALUSCHE (2008) oder RUDLOFF (2010).¹⁴ Die Ausgangsbasis bilden dabei in vielen Fällen die für die Kostenplanung von Hochbauimmobilien relevanten Normen DIN 276-1 und DIN 18960. Darüber hinaus erfolgt eine Ausrichtung der Modelle an den Anforderungen des Nutzers (Miete, Lage, Gestaltung usw.), die als wesentlicher Bestandteil der Lebenszyklusphilosophie in die verschiedenen Modelle einfließen. Zusammen mit der zu Tunnelbauwerken differierenden Zielstellung einer wirtschaftlichen Projektumsetzung bzw. Vermarktung aus Sicht des Investors, ermöglichen diese Kriterien keine unmittelbare Übertragung vorhandener Modelle auf Tunnelbauwerke.

Sinngemäß gilt dies auch für Lebenszykluskostenmodelle von Brückenbauwerken. Durch die meist untergeordnete technische Ausstattung liegt der Fokus dieser Modelle auf dem originären Bauwerk. Eine strukturierte Erfassung der Kosten und Leistungen der bei Tunnelbauwerken sehr ausgeprägten verkehrs- und sicherheitstechnischen Ausstattung erfolgt nicht. Stattdessen werden die Kosten meist als pauschale Zuschläge (z. B. als Prozentsatz der Investitionskosten) mit einer unzureichenden Transparenz einbezogen.¹⁵

¹⁰ vgl. GREINER, MAYER, STARK (2005), S. 181

¹¹ vgl. MCKINSEY (2008), S. 24; VOGT (2012), S. 25; THEWES, VOGT (2014), S. 421

¹² vgl. BRH (2007), S. 128

¹³ vgl. BECKER (1986), S. 33

¹⁴ vgl. RIEGEL (2004); HERZOG (2005); PELZETER (2006); KALUSCHE (2008); RUDLOFF (2010)

¹⁵ vgl. SCHACH ET AL. (2006); JODL (2010); GRAUBNER, KNAUFF, PELKE (2011)

Das Fehlen geeigneter Modelle für Tunnelbauwerke nimmt VOGT zum Anlass und entwickelt ein Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln.¹⁶ Abgesehen von HASENAUER, STROHMEIER, MAK¹⁷, werden erstmalig die Grundzüge der Lebenszykluskostenrechnung und die Spezifikationen des Tunnelbaus zusammengeführt. Die verursachergerechte Zuweisung von Erst- und Folgekosten dient der Unterstützung der Entscheidungsfindung. Diese Ansätze werden im Zuge dieser Arbeit aufgegriffen und hinsichtlich einer Generierung von Optimierungsansätzen für eine ganzheitliche Kostenreduzierung erweitert.

1.2 Zielstellung

Aus der Darstellung der Ausgangssituation ist abzuleiten, dass sich das bisherige Vorgehen zur Optimierung der Kosten von Tunnelbauwerken im Wesentlichen auf die Planungsphase im Zuge eines Neubaus bzw. einer grundlegenden Sanierung von Bestandsbauwerken konzentriert.¹⁸ Dabei wird in vielen Fällen lediglich eine Reduzierung der Herstellkosten angestrebt. Folgekosten bleiben trotz ihrer Ausprägung unberücksichtigt bzw. finden nur unvollständig Einzug in den Entscheidungsprozess.

Demgegenüber prägt das Leitbild der Nachhaltigkeit, zurückzuführen auf VON CARLOWITZ¹⁹, zunehmend die gesellschaftliche Ausrichtung von Politik, Wirtschaft und Privatem. Bereits Ende des 20. Jahrhunderts haben verschiedene Kommissionen und Verbände eine Reihe von Leitbildern und Agenden entwickelt, die eine Umsetzung der Nachhaltigkeit auf allen gesellschaftlichen Ebenen ermöglichen soll.²⁰

Ausgehend von diesen Grundsätzen wurden mit der Einführung des Leitfadens „Nachhaltiges Bauen“ durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) im Jahr 2001 wesentliche Ziele einer nachhaltigen Entwicklung auf das Bauwesen in Deutschland übertragen. Die Grundidee lag in der Umsetzung nachhaltiger Bauwerke für die öffentliche Verwaltung auf Bundesebene. Ziel dabei ist es, die vorhandenen ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Ressourcen mit Blick auf nachfolgende Generationen schonend einzusetzen.²¹

Vor diesem Hintergrund muss das Ziel eines nachhaltigen Umgangs mit vorhandenen wirtschaftlichen Ressourcen auch auf Tunnelbauwerke Anwendung finden. Hierfür ist es notwendig, ausgehend von der jeweiligen Aufgabenstellung, die Gesamtkosten von Tunnelbauwerken zu reduzieren und letztlich das ökonomische Optimum anzustreben. Dies gilt sowohl für neu zu errichtende als auch für in Betrieb befindliche Tunnelbauwerke. Dabei sind die gestellten Anforderungen hinsichtlich Sicherheit, Dauerhaftigkeit und Verfügbarkeit grundsätzlich aufrecht zu erhalten.

¹⁶ vgl. VOGT (2012)

¹⁷ vgl. HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983)

¹⁸ vgl. HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983); VOGT (2012) S. 24 ff.; THEWES ET AL. (2013)A, S. 241

¹⁹ vgl. VON CARLOWITZ (1713)

Hans Carl von Carlowitz legte mit seiner Abhandlung „Sylvicultura oeconomica“ den Grundstein für das heutige Verständnis von Nachhaltigkeit. Er warnt in seiner Veröffentlichung vor einer Übernutzung der Wälder und fordert eine Umkehr hin zu einer auf die Zukunft ausgerichteten Holzwirtschaft.

²⁰ bspw. Brundtland-Bericht der WCED, 1987 [WCED (1987)],

AGENDA 21 der Vereinten Nationen, 1992 [UN (1992)],

Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“, 1998 [DEUTSCHER BUNDESTAG (1998)]

²¹ vgl. BBR (2001), S. 1

Nach DIN EN 15643-4 definiert sich die ökonomische Qualität eines Bauwerkes über „(...) *die im Verlauf des Lebenszyklus anfallenden Kosten*“.²² Dies bedeutet, dass sich eine wirtschaftliche Planung eines Tunnelbauwerkes nicht darauf reduziert, die Errichtungskosten möglichst gering zu halten. Vielmehr sind neben den Erst- auch die Folgekosten in den Planungs- und Optimierungsprozess gleichwertig zu integrieren.²³ Ziel muss es sein, die gesamten über den Lebenszyklus anfallenden Kosten eines Tunnelbauwerkes entsprechend dem ökonomischen Prinzip zu minimieren.²⁴

Aus dieser Zielstellung heraus lässt sich die für diese Arbeit relevante Forschungsfrage ableiten:

Wie ist eine ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken ganzheitlich umsetzbar?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage und zur Umsetzung der Zielstellung hinsichtlich einer Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken sind in Abs. 2.3 Kriterien bestimmt worden, die es zu erfüllen gilt:²⁵

- ganzheitliche Berücksichtigung von Bauwerk, Lebensphasen und Kosten
- konsistente, wiederverwendbare Strukturen für das Bauwerk, den Lebenszyklus, die Kosten sowie die Leistungen und Prozesse
- transparente und nachvollziehbare Strukturierung der Kosten
- Anpassungsfähigkeit und Detaillierungsmöglichkeit abhängig vom Planungs- und Informationstand bzw. von der verfolgten Zielstellung
- Grundlage für eine aktive ökonomische Optimierung
- Möglichkeit zur Berücksichtigung von Prognoseunsicherheiten
- Umsetzung einer kontinuierlichen Optimierung der Kosten

Dazu gehört auch, die Grundlagen zu schaffen, die notwendigen Daten strukturiert erfassen zu können, so dass die Bildung von Kostenkennwerten für eine verbesserte Kostenplanung ermöglicht wird. Zudem sind aus der Strukturierung heraus die Kostentreiber und Einflussparameter zu identifizieren, die die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken maßgeblich bestimmen.

1.3 Abgrenzung

Die Vielfältigkeit von Tunnelbauwerken hinsichtlich der Nutzungsart, z. B. als Straßentunnel, Eisenbahntunnel, Fußgängertunnel oder Medientunnel, macht es erforderlich, für die weitere Bearbeitung eine Eingrenzung des zu untersuchenden Systems und des Untersuchungsgegenstandes vorzunehmen.

²² DIN EN 15643-4 (2012), S. 18

²³ vgl. MÖLLER, KALUSCHE (2013), S. 247

²⁴ An diese Stelle ist auf das Minimalprinzip abzustellen: Umsetzung vorgegebener Ziele bei minimalem Mitteleinsatz.

vgl. BORCHARDT (1983), S. 143

²⁵ Die Herleitung und Ausgestaltung der Kriterien erfolgt ausführlich in Abs. 2.3.

Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur verfügen gegenüber anderen Nutzungsarten über einen sehr ausgeprägten Anteil an Betriebs- und Sicherheitstechnik. Diese ist notwendig, um die vorhandenen Sicherheitsrisiken, bedingt durch den Individualverkehr, zu minimieren. Durch die damit verbundene Komplexität und den daraus resultierenden Leistungen richtet sich der Fokus für die weitere Bearbeitung auf Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur. Das zu entwickelnde Modell und die damit in Verbindung stehenden Methoden sind dabei so flexibel auszugestalten, dass eine Übertragung und Anwendung für andere Verkehrsträger (z. B. Bahn, Fußgänger) bzw. ähnlich gelagerte Rechtsvorschriften (z. B. Österreich, Schweiz) möglich sind.

Als Untersuchungsgegenstand dient ausschließlich das Tunnelbauwerk sowie die für einen sicheren Betrieb notwendigen sekundären Bauwerke wie Betriebsgebäude, Rettungsstollen, Tunnelportal usw. Zur besseren Vergleichbarkeit bleiben beispielsweise vor- und nachgelagerte Verkehrswege, externe Überwachungszentralen oder Bauwerke des Straßenbetriebsdienstes unberücksichtigt.

Die Systemgrenzen für den Untersuchungsrahmen werden auf die Erfassung und Optimierung der originären Lebenszykluskosten beschränkt. Das bedeutet, dass entsprechend dem Grundgedanken der Lebenszykluskostenrechnung lediglich auf die Kosten eines Systems abgestellt wird.²⁶ Verfolgt wird der Leitgedanke des ökonomischen Prinzips: eine Zielerreichung mit möglichst geringem Mitteleinsatz (Minimalprinzip).²⁷ Externe Kosten (Unfallkosten, stauinduzierte Kosten usw.) bleiben dabei ebenso außen vor, wie mögliche Einnahmen (z. B. Mauteinnahmen).²⁸ Allerdings sind die Grundlagen zu schaffen, die eine zukünftige Einbeziehung dieser Größen ermöglichen.

Das grundsätzliche Ziel umfasst die Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken. Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen und Abhängigkeiten sowie der fehlenden Möglichkeit, diese mathematisch umfassend abzubilden, ist die Bestimmung des wirtschaftlichen Optimums wenig sinnvoll. Es soll vielmehr die Basis geschaffen werden, die Kosten gezielt zu optimieren und dadurch eine Reduzierung der Gesamtkosten zu erreichen.

Grundsätzlich wird von einem vergleichbaren Niveau hinsichtlich der technischen bzw. sicherheitstechnischen Standards, aber auch der Funktionsfähigkeit für eine direkte Gegenüberstellung der einzelnen Varianten ausgegangen. Ist die Einhaltung eines vollständig konsistenten Untersuchungsrahmens nicht möglich, hat durch weiterführende Faktoren eine Anpassung zur Herstellung einer Vergleichbarkeit zu erfolgen. Wie dies aussehen kann, ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit und wäre durch weitere Forschungsarbeiten zu untersuchen.

1.4 Vorgehensweise

Zur Umsetzung der Zielstellung, die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken gezielt zu optimieren, ist es erforderlich, in **Abschnitt 2** den Forschungsbedarf exakt abzugrenzen. Dazu ist im Vorfeld festzustellen, inwieweit in der Praxis ökonomische Betrachtungen, insbesondere mit der Zielstellung einer Kostenoptimierung, bereits Anwendung finden und

²⁶ vgl. GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997), S. 902

²⁷ vgl. HANUSCH, KUHN, GREINER (2005), S. 2

²⁸ U. a. THEWES, VOGT (2010), S. 314; GRAUBNER ET AL. (2010), S. 336; SAUER ET AL. (2012), S. 968 f.; Kamarianakis, ADDEN, THEWES (2013); THEWES ET AL. (2014), S. 43; ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2014), S. 476, beziehen diese indirekten ökonomischen Effekte – abhängig von der jeweiligen Zielstellung – in den Untersuchungsrahmen mit ein.

diese die Zielstellung erfüllen. In einer weiteren Untersuchung werden wesentliche Forschungsarbeiten hinsichtlich der Zielstellung einer ökonomischen Optimierung von Tunnelbauwerken einer kritischen Würdigung unterzogen. Aus den sich ergebenden Erkenntnissen wird eine weitere Präzisierung der Forschungsfrage vorgenommen. Hierfür ist es erforderlich, die notwendigen Kriterien für das zu entwickelnde Modell bzw. der für die Optimierung erforderlichen Vorgehensweise zu definieren.

Aufbauend auf dem Forschungsbedarf werden in den **Abschnitten 3 und 4** die Grundlagen erarbeitet, die für die Entwicklung des Modells und der Methodik zur Umsetzung einer ganzheitlichen ökonomischen Optimierung notwendig sind. Dazu wird in **Abschnitt 3** der Begriff der Lebenszykluskostenrechnung in seiner Bedeutung für das weitere Vorgehen abgegrenzt. Zusätzlich werden die bisher entwickelten Ansätze zu dieser Thematik – in Verbindung mit der Investitionsrechnung – auf ihre Anwendbarkeit für die verfolgte Zielstellung hin untersucht. Zur angestrebten Einbeziehung von Unsicherheiten in die Lebenszykluskostenrechnung werden die Grundlagen sowie die vorhandenen Verfahren aufgezeigt. Für die Risikoanalyse, als das für die Zielstellung geeignetste Verfahren, erfolgt eine vertiefte Auseinandersetzung im Hinblick auf die Ausgestaltung der Risiken, die Ergebnisbewertung sowie die Möglichkeiten zur Erhebung der probabilistischen Eingangsgrößen.

Zur Ausweitung des Konzeptes für eine kontinuierliche Optimierung der Kosten erfolgt eine Anwendung des Managementinstruments „Benchmarking“. Hierzu werden in **Abschnitt 4** die notwendigen Grundlagen, insbesondere zur Begriffsdefinition und zum Verfahrensablauf, für einen Einsatz im Rahmen der definierten Zielstellung geschaffen.

Abschnitt 5 bildet den Übergang von der Erarbeitung der Grundlagen hin zur eigentlichen Umsetzung der Zielstellung. Dabei wird eine Einsortierung des zu entwickelnden Modells in die modell- bzw. systemtheoretischen Ansätze vorgenommen. Abgeleitet aus den wissenschaftstheoretischen Grundsätzen, wird die hierarchisch-modulare Strukturierung von Bauwerk und Kosten als geeignete Modellstruktur vorgestellt.

In **Abschnitt 6** erfolgt die Entwicklung und Ausgestaltung des Modularen Prozessmodells. Die Struktur des Modells mit den einzelnen Ebenen wird allgemeingültig hergeleitet. Ausgangsbasis stellen dabei die in Abs. 1.3 festgelegten Untersuchungsgrenzen sowie die vorliegenden normativen Vorgaben dar. Es wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die eine eigenständige Bestimmung der für das Modell wesentlichen Module, unter Beachtung der notwendigen Randbedingungen, erlaubt. Im weiteren Schritt wird die interne Struktur der Module bestimmt. Zur Gewährleistung einer Integrierbarkeit und Wiederverwendbarkeit werden der Aufbau der Module und die Ausgestaltung der einzelnen Attribute allgemeingültig hergeleitet. Zusätzlich werden die im Lebenszyklus anfallenden Leistungen in übergeordnete Prozesse zusammengefasst, wobei die Prozesse in der Form definiert werden, dass eine Anwendbarkeit für alle Systemebenen ermöglicht wird. Abschließend werden aus der vorgenommenen Strukturierung, zusammen mit den Modulen und Prozessen, die für das weitere Vorgehen notwendige konsistente Kostenstruktur und die aus den vorhandenen Interdependenzen resultierende Schnittstellenmatrix abgeleitet. Unter Berücksichtigung der zeitlichen Komponente wird die Kostenmatrix erweitert und unter Einbeziehung der Schnittstellen das Modulare Prozessmodell vervollständigt.

Zur Umsetzung einer Optimierung der Lebenszykluskosten wird in **Abschnitt 7** eine eigenständige Methodik entwickelt. Auf Basis des Modularen Prozessmodells wird eine Vorgehensweise vorgestellt, die eine transparente Bestimmung der Lebenszykluskosten ermöglicht. Darauf aufbauend erfolgt unter Einbeziehung der Schnittstellen eine gezielte Generierung und Umsetzung von Optimierungsansätzen.

Für die Implementierung einer Risikoanalyse in der Lebenszykluskostenrechnung wird in **Abschnitt 8** eine zusätzliche Methodik vorgestellt. Dazu werden vorgelagert die im Modell als unsicher einzustufenden Attribute bestimmt und das Modulare Prozessmodell hinsichtlich der Einbindung probabilistischer Eingangsgrößen erweitert. Zur Bestimmung der Lebenszykluskosten und der Generierung von Optimierungsansätzen wird, unter Verwendung der in Abs. 7 entwickelten deterministischen Vorgehensweise, die Systematik der Monte-Carlo-Simulation in die Methodik integriert.

In **Abschnitt 9** erfolgt eine Erweiterung der bisher auf singuläre Zeitpunkte beschränkten Lebenszykluskostenrechnung. Durch Implementierung des Benchmarking-Konzeptes wird eine kontinuierliche Optimierung möglich. Dafür wird das bisher bekannte Phasenmodell des Benchmarking auf die Spezifikationen von Tunnelbauwerken angepasst und durch Integration des Modularen Prozessmodells erweitert.

Abschließend erfolgt in **Abschnitt 10** eine Verifizierung der Funktionalität und Anwendbarkeit der entwickelten Ansätze zur Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken. Dazu werden an einem realitätsnahen Beispiel mit abgegrenztem Untersuchungsumfang die Lebenszykluskosten (deterministisch) bestimmt. Auf Basis der erhobenen Schnittstellen erfolgt eine Generierung und Untersuchung von Optimierungsansätzen. Für eine weitergehende Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Varianten wird eine Erhebung der probabilistischen Eingangsgrößen vorgenommen. Abschließend erfolgt mit Hilfe der Risikoanalyse eine erneute Bewertung der Ergebnisse der (probabilistischen) Lebenszykluskostenrechnung. Aus den Ergebnissen wird die umzusetzende Planungsvariante bestimmt.

Die Verifizierung des Modells zur kontinuierlichen Optimierung wird mit dem bereits vorgestellten Mustertunnel und einem fiktiven Vergleichstunnel vorgenommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass sich beide Bauwerke seit mehreren Jahren in der Betriebsphase befinden. Durch Gegenüberstellung mit dem Vergleichstunnel werden Leistungslücken am Mustertunnel identifiziert und Optimierungsansätze abgeleitet. Abschließend erfolgt eine Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Ansätze. Daraus abgeleitet wird das weitere Vorgehen zur Umsetzung der Optimierung festgelegt.

2 Ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken

Die Zielstellung der vorliegenden Arbeit umfasst die Erfassung und Optimierung der Lebenszykluskosten, abgegrenzt auf Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur. Im ersten Schritt ist zu untersuchen, inwieweit die gesteckten Ziele in der Praxis bereits Anwendung finden bzw. die Wissenschaft Ansätze für eine Umsetzung liefert. Hierfür sind die bisherigen ökonomischen Betrachtungen aus der Praxis bzw. aus der Forschung auf Übereinstimmung mit den in der Zielstellung formulierten Kriterien (Abs. 1.2) zu prüfen. Folgende Punkte gilt es dabei in die Bewertung der einzelnen Ansätze einzubeziehen:²⁹

- ganzheitliche Berücksichtigung von Bauwerk, Lebensphasen und Kosten
- transparente und nachvollziehbare Aufstellung der Kosten
- ausreichende Anpassungsfähigkeit bzw. Detaillierung je nach Informationsstand
- konsistente, wiederverwendbare Strukturen für eine Vergleichbarkeit
- Grundlage für eine aktive Optimierung der Kosten
- Möglichkeit zur Berücksichtigung von Prognoseunsicherheiten

Aufbauend auf den Erkenntnissen, inwieweit die Kriterien bereits Umsetzung gefunden haben, ist der Forschungsbedarf zur Umsetzung der Zielstellung festzustellen.

2.1 Ökonomische Betrachtungen für Tunnelbauwerke in der Praxis

Die Kosten von Tunnelbauwerken werden – wie auch bei anderen Bauwerken – wesentlich in den ersten Planungsphasen geprägt. Dabei nimmt die Beeinflussbarkeit der Kosten mit voranschreitendem Planungsstadium immer weiter ab.³⁰ Aus diesem Grund ist zunächst zu untersuchen, welche wesentlichen Planungsphasen im Zuge der Errichtung von Tunnelbauwerken auftreten und in welchem Umfang aktuell dabei Kostenplanungen bzw. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen erfolgen.

Zusätzlich existieren für die Planung bereits Leitfäden und Richtlinien zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, deren Anwendung verbindlich vorgeschrieben bzw. angeraten wird. Aus der großen Anzahl der vielfältigen Ansätze werden an dieser Stelle die Leitfäden und Richtlinien eingehender betrachtet, die eine globale Kostenreduzierung verfolgen. Ansätze mit einem abgegrenzten Betrachtungsrahmen werden aufgrund der fehlenden Ganzheitlichkeit nur exemplarisch angeführt.

Die Realisierung von Infrastrukturbauwerken in Form von ÖPP-Projekten gewinnt aktuell an Bedeutung. Dabei wird durch Effizienzsteigerungen eine Optimierung über den gesamten Konzessionszeitraum und damit eine Reduzierung der Kosten für den öffentlichen Auftraggeber angestrebt. Die Untersuchung der Vorgehensweise für Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei ÖPP-Projekten soll Aufschluss darüber liefern, inwieweit eine ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken hiermit umgesetzt werden kann.

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf das in Deutschland übliche Vorgehen zur Kostenplanung und zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Ähnliche Richtlinien, Leitfäden bzw. Vorgehensweisen finden sich in Österreich bzw. in der Schweiz. International sind allerdings kaum vergleichbare Strukturen zu erkennen. Aus diesem Grund richtet sich der Fokus auf die in Deutschland anzuwendenden Richtlinien und Leitfäden.

²⁹ Die Ausgestaltung der Kriterien erfolgt ausführlich in Abs. 2.3.

³⁰ vgl. HSVV (2006), S. 3

2.1.1 Kostenplanung und ökonomische Bewertung im Zuge der Planung

Der Planungs- und Errichtungsprozess von Tunnelbauwerken – als Teil der Verkehrsinfrastruktur – unterliegt einer eigenen Struktur und Herangehensweise. Vier konsekutive Verfahrensebenen sind für diesen Prozess vorgesehen (Tabelle 2.1).³¹

Die einzelnen Verfahrensebenen umfassen unterschiedliche Planungsstufen bzw. Verwaltungsverfahren, die den Leistungsphasen aus der HOAI³² (für Verkehrsanlagen bzw. Ingenieurbauwerke) entsprechend zugeordnet werden können (Tabelle 2.1). Die Leistungsphasen (Lph) der HOAI sind dabei um die Lph 0 – Projektentwicklung – als Zuordnung für die Bedarfsplanung zu erweitern.

Tabelle 2.1: Verfahrensebenen bei Planung und Bau von Verkehrswegeprojekten³³

Verfahrensebenen	Planungsstufen bzw. Verwaltungsverfahren	Entscheidungsinhalte	Leistungsphasen HOAI
Bedarfsplanung	Vorbereitung des BVWP und Projektanmeldungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedarfsentscheidung über Zielnetze, die aus gesamtwirtschaftlich vorteilhaften Neu- und Ausbauprojekten bestehen 	Lph. 0 Projektentwicklung
	Aufstellung des BVWP bis Kabinettsbeschluss		
	Aufstellung von Bedarfsplänen, Gesetzgebungsverfahren zu Ausbaugesetzen Straße und Schiene		
Raumordnung	Voruntersuchungen, Erstellung der Raumordnungsunterlagen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Voruntersuchung ▪ Raumordnerische Verträglichkeit ▪ Umweltverträglichkeit ▪ Verlauf und grundsätzliche techn. Ausführungsmerkmale ▪ Varianten- bzw. Standortvergleich 	Lph. 1 Grundlagenermittlung Lph. 2 Vorplanung
	Raumordnungsverfahren		
	Linienbestimmung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bestimmung der Linienführung bei Bundesfernstraßen 	
Zulassung	Entwurfsplanung, Genehmigungsplanung, Erstellung der Planfeststellungsunterlagen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vorentwurf bzw. Feststellungsentwurf der Vorzugsvariante ▪ Umfassende materielle Rechtmäßigkeit ▪ Parzellenscharfe Lage und Ausführung des Vorhabens mit notwendigen Nebenanlagen u. Folgemaßnahmen, Festlegung von Ausgleichs- u. Ersatzmaßnahmen 	Lph. 3 Entwurfsplanung Lph. 4 Genehmigungsplanung
	Planfeststellungsverfahren		
Bau	Ausführungsplanung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Weitere Details der Bauausführung 	Lph. 5 Ausführungsplanung
	Bauausführung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technische Details der Bauausführung 	Lph. 8 Bauüberwachung

³¹ vgl. BMVBS (2012), S. 16

Von dem in Tabelle 2.1 vorgestellten Ablauf wird für Tunnelbauwerke dahingehend abgewichen, dass erst mit Genehmigung der Trasse (Lph. 4) eine dezidierte Entwurfsplanung (Lph. 3) für das eigentliche Tunnelbauwerk erfolgt. Das bedeutet, dass die Lph. 3 und 4 in umgekehrter Reihenfolge bearbeitet werden.

³² Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen HOAI [HOAI (2013)]

³³ in Anlehnung an BMVBS (2012), S. 10 und S. 16 sowie KAMARIANAKIS (2013), S. 8

Wie Tabelle 2.1 zu entnehmen ist, sind in den verschiedenen Planungsstufen von Infrastrukturprojekten – somit auch bei Tunnelbauwerken – neben technischen, ökologischen und sozialen Kriterien, auch unterschiedliche Planungen und Untersuchungen zu ökonomischen Kriterien im Verfahrensablauf vorgesehen. Zur Bewertung der Kosten bzw. der Wirtschaftlichkeit liegt bereits eine Vielzahl an normativen Regelungen bzw. Bewertungsmethoden vor. Diese umfassen u. a.:

- Gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik Bundesverkehrswegeplan 2003 (BVWP 2003)
- Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS 1997)
- Anweisung zur Kostenberechnung für Straßenbaumaßnahmen (AKS)
- Richtlinie für das Aufstellen von Ingenieurbauten (RAB-ING)
- DIN 276 – Kosten im Bauwesen – Teil 4: Ingenieurbau (DIN 276-4)
- Ablösungsbeträge-Berechnungsvorschrift (ABBV)

Darüber hinaus wurden für unterschiedliche Problemstellungen weiterführende Entscheidungshilfen bzw. Leitfäden entwickelt, die aktuell als Grundlage zur ökonomischen Optimierung im Planungsprozess dienen.

Im Folgenden werden die wesentlichen Grundzüge der einzelnen Regelungen bzw. Bewertungsverfahren eingehender vorgestellt und auf die Anwendbarkeit zur ganzheitlichen Kostenoptimierung bewertet.

2.1.1.1 Gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik Bundesverkehrswegeplan 2003 (BVWP 2003)

Beim BVWP 2003 handelt es sich um eine „Gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik“ zur Festlegung der Dringlichkeit baulicher Maßnahmen der Verkehrsinfrastruktur (Straße, Schiene, Wasser).³⁴ Bewertet wird die Wirtschaftlichkeit der geplanten Investition im Rahmen der Bedarfsplanung (Bundesverkehrswegeplan). Die Methodik beruht auf einer Nutzen-Kosten-Analyse (NKA). Das dabei ermittelte Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) dient als Entscheidungsgrundlage zur Bestimmung zukünftiger Infrastrukturinvestitionen im Rahmen des Bundesverkehrswegeplanes.

Zur Ermittlung der Beurteilungsgröße NKV werden die Auswirkungen der aktuellen Verkehrssituation (Vergleichsfall) der geplanten Situation (Planfall) gegenübergestellt und die Projektwirkungen – soweit möglich – monetär erfasst. Die zeitliche Vereinheitlichung und damit die Herstellung der Vergleichbarkeit aller relevanten monetären Größen (Kosten und monetarisierter Nutzen) erfolgt durch Zinseszinsrechnung auf Basis der Kapitalwertmethode. Der Betrachtungszeitraum für die einzelnen Projekte bestimmt sich aus der projektspezifischen mittleren Nutzungsdauer (ausgehend von dem globalen Annuitätenfaktor) und der Aktualisierungsrate (entspricht dem Kapitalzinssatz für die Kapitalwertmethode).

In der NKA werden die direkten Bewertungskriterien

- Erhaltung der Verkehrswege (NW) und
- Investitionskosten (K)

als monetäre Größen einbezogen.

³⁴ vgl. BMVBS (2005)

Die zur Erhaltung der Verkehrswege anfallenden Kosten (NW) setzen sich aus den Erneuerungs- (NW1) und Instandhaltungskosten (NW2) zusammen. **Erneuerungskosten (NW1)** fallen für Maßnahmen an, die im Wesentlichen zur Erhaltung der Leistungsfähigkeit des Verkehrsweges aufzuwenden sind. Es handelt sich im eigentlichen Sinne um Einsparungen, die dadurch erzielt werden, dass infolge der Realisierung eines Projektes notwendige Ausgaben für die Erneuerung existierender Streckenabschnitte (inkl. Bauwerke) obsolet werden. Ihre Ermittlung hat eigenständig zu erfolgen. **Instandhaltungskosten (NW2)** hingegen umfassen Maßnahmen für Betrieb und Unterhaltung, deren Wirkung sich auf höchstens ein Jahr beschränkt. Im Zuge von Straßenprojekten fallen jährliche Instandhaltungskosten für den Betrieb (Winterdienst) sowie kleinere Instandhaltungsmaßnahmen an. Diese werden für Tunnelbauwerke – unabhängig von Lage, Verkehrsaufkommen usw. – als pauschale Größen ausgewiesen.³⁵

- 2 Röhren + 2 Fahrstreifen je Röhre: 255.600 €/km und Jahr
- 2 Röhren + 3 Fahrstreifen je Röhre: 291.400 €/km und Jahr
- 1 Röhre + 2 Fahrstreifen: 168.700 €/km und Jahr

Die Ermittlung der **Investitionskosten (K)** hat mit Hilfe der in der AKS³⁶ vorgesehenen Kosten-Untergruppen differenziert und realitätsnah zu erfolgen. Sofern eine ausreichende Aufgliederung der Kosten entsprechend AKS nicht vorliegt bzw. nicht vorgenommen werden kann, sind die Investitionskosten auf Basis durchschnittlicher Anlageinvestitionen zu erheben (Tabelle 2.2).

Tabelle 2.2: Mittlere Kostenstruktur von Straßenprojekten zur Berechnung der einzelnen Anlageinvestitionen bei Angabe der Gesamtkosten³⁷

	Grund- erwerb	Kunstbau- werke	Erdbau	Oberbau	Ausstattung und Sonstiges
Anteil an Gesamtkosten	13 %	30 %	25 %	22 %	10 %

Zur Bestimmung des Nutzen-Kosten-Verhältnisses sind die Kosten für die Erhaltung (NW) den Nutzenkomponenten zuzuordnen. Die Investitionskosten (K) stellen den einzigen Beitrag zu den Kostenkomponenten dar. Alle weiteren Kriterien umfassen externe Kosten bzw. nicht monetarisierbare (Umwelt-) Auswirkungen aus Umweltrisikoeinschätzungen (URE) oder Raumwirksamkeitsanalysen (RWA), die für eine Optimierung der Lebenszykluskosten des originären Bauwerkes keine Relevanz aufweisen.

Für den neu zu erstellenden Bundesverkehrswegeplan 2015 wird die Bewertungsmethodik BVWP 2003 überarbeitet. Aktuelle Forschungsarbeiten sollen dazu beitragen, die Bewertungsmethodik weiterzuentwickeln. Das grundsätzliche Verfahren bleibt jedoch im Wesentlichen unverändert. Einzig in Bezug auf die Investitionskosten wird eine Verbesserung der Transparenz der Kostenbestimmung bzw. -zuweisung angestrebt.³⁸ Entsprechende Forschungsergebnisse sind bislang nicht veröffentlicht.

³⁵ vgl. BMVBS (2005), S. 178

³⁶ siehe hierzu Abs. 2.1.1.3 – AKS / RAB-ING / DIN 276-4

³⁷ BMVBS (2005), S. 211

³⁸ vgl. BMVBS (2014)

Bei der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung auf Basis des BVWP 2003 steht nicht das singuläre Bauwerk im Fokus. Vielmehr wird die Findung einer volkswirtschaftlichen Gesamtlösung im Verkehrswegenetz angestrebt. Dieser übergeordnete Betrachtungsrahmen erschwert eine dezidierte Auseinandersetzung auf Bauwerksebene. Die vorgegebenen Bewertungsbestandteile aus Sicht der Kosten (Investitions- und Erhaltungskosten) begrenzen die Optimierungsansätze, was eine ganzheitliche Kostenreduzierung ausschließt. Fehlende Angaben, u. a. auf welcher Basis die vorgegebenen Kennwerte bestimmt wurden und wie sich diese zusammensetzen, zeigen die mangelnde Transparenz dieses Verfahrens. Für eine gezielte ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken sind entsprechende Vorgehensweisen nicht konzipiert. Der übergeordnete Betrachtungsrahmen und die selektiven Bewertungsbestandteile sind dafür ausschlaggebend.

2.1.1.2 Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen (EWS 1997)

Wie bei dem Bewertungsverfahren BVWP 2003 handelt es sich bei den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Straßen (EWS) um eine Bewertungsmethodik, die eine ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Straßenbaumaßnahmen anstrebt. Ziel ist eine „(...) volkswirtschaftliche Beurteilung von Straßeninfrastrukturmaßnahmen nach einheitlichen Grundsätzen“.³⁹ Das zu ermittelnde Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) gibt dabei Aufschluss, inwieweit die geplanten Investitionsmaßnahmen aus volkswirtschaftlicher Sicht vorteilhaft sind. Anders als beim BVWP 2003, ist die Anwendung der EWS auf Projekte der Straßeninfrastruktur und deren Bestandteile (Tunnel, Brücken usw.) beschränkt.

Vergleichbar mit der Methodik des BVWP 2003 werden durch Anwendung einer Nutzen-Kosten-Analyse alle als volkswirtschaftlich relevant eingestuften Nutzen den Kosten gegenübergestellt. Der Bewertungsrahmen bei der Anwendung der EWS beschränkt sich auf acht Nutzen- und zwei Kostenkomponenten. Diese umfassen jeweils die Veränderung der Nutzen bzw. der Kosten, die aus der Differenz von Planungsfall (Umsetzung der Maßnahme) und Vergleichsfall (Nichtumsetzung der Maßnahme) resultieren. Die aus ökonomischer Sicht relevanten Kostenkomponenten umfassen

- Investitionskosten (KI) und
- laufende Kosten (KL).

Die **Investitionskosten (KI)** erfassen sämtliche Kosten, die zur Umsetzung der Maßnahmen (Herstellung oder Erneuerung) erforderlich sind. Anders als bei der Bewertungsmethodik zum BVWP 2003 werden die **laufenden Kosten (KL)** nicht den Nutzen, sondern den Kosten zugeschrieben. Sie fallen für den Unterhalt der Straße bzw. der enthaltenen Bauwerke an. Der Unterhalt umfasst Sofortmaßnahmen, Maßnahmen kleineren Umfangs und Arbeiten zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft (Reinigung, Kontrolle, Winterdienst usw.). Für die einzelnen Bestandteile einer Straße, u. a. für Tunnelbauwerke, sind durchschnittliche Grundwerte als pauschale Kostenansätze in Tabelle 15 der EWS ausgewiesen.⁴⁰

- Tunnel BAB (2 Röhren) 500.000 DM/km und Jahr (= 255.645 €/km und Jahr)
- Tunnel agO/igO⁴¹ (1 Röhre) 300.000 DM/km und Jahr (= 153.387 €/km und Jahr)

³⁹ FGSV (1997), Vorwort

⁴⁰ vgl. FGSV (1997), S. 29 und S. 31

⁴¹ agO = außerhalb geschlossener Ortschaften, igO = innerhalb geschlossener Ortschaften

Zusätzliche Kosten, die beispielsweise aus dem Betrieb von Tunnelbauwerken resultieren, sind gesondert zu erfassen. Dies bedeutet, dass vor allem die Kosten für Energie (Beleuchtung, Lüftung usw.) zusätzlich zu bestimmen und den Grundwerten zuzuschlagen sind.

Die angegebenen Kennwerte für die laufenden Kosten von Tunnelbauwerken stimmen, nach Umrechnung in Euro (€), mit den Werten vergleichbarer Bauwerke aus dem BVWP 2003 überein. Zusammen mit der gleichartigen Vorgehensweise lässt dies darauf schließen, dass die Methodik des BVWP 2003 eine Fortschreibung und Erweiterung der EWS darstellt. Weitere Bewertungsverfahren, wie z. B. das Bewertungsverfahren des 7. Ausbauplanes für die Staatsstraßen in Bayern o. ä., basieren ebenfalls auf der Methodik der EWS 1997 bzw. des BVWP 2003. Es erfolgt lediglich eine Anpassung an den vorgesehenen Untersuchungsrahmen und die jeweilige Zielstellung, wobei die grundsätzliche Herangehensweise unverändert bleibt.

Wie auch bereits die Methodik des BVWP 2003 sind die EWS oder vergleichbare Verfahren für eine übergeordnete Bewertung der Wirtschaftlichkeit von baulichen Maßnahmen anzuwenden. Für eine gezielte Optimierung, beispielsweise eines Straßentunnels, sowohl als Neubau als auch im Bestand, sind die einzelnen Verfahren aufgrund des übergeordneten Charakters nicht konzipiert.

2.1.1.3 AKS / RAB-ING / DIN 276-4

Für das einheitliche Aufstellen von Kostenberechnungen während der Planungsphase – im Besonderen mit Beginn der Entwurfsphase – dient die Anweisung zur Kostenberechnung für Straßenbaumaßnahmen (**AKS**) als normative Grundlage. Ergänzt durch die Richtlinie für das Aufstellen von Ingenieurbauten (**RAB-ING** bzw. RAB-BRÜ⁴²) stehen dem Anwender Formblätter zur Kostenberechnung (Formblatt A, D und E⁴³) für die unterschiedlichen Arten von Ingenieurbauwerken zur Verfügung.⁴⁴

Zur Strukturierung der Kosten erfolgt eine Einteilung – abhängig von der Art des Bauwerkes – in sog. Hauptgruppen. Tunnelbauwerke in geschlossener Bauweise sind der Hauptgruppe 6, in offener Bauweise hergestellte Bauwerke sind der Hauptgruppe 7 zuzuordnen. Die betriebstechnische Ausstattung ist, unabhängig von der Art des Bauwerkes, gesondert in Hauptgruppe 8 zu erfassen. Die Kosten selbst sind dabei entsprechend der Zuordnung in Gruppen aufgegliedert. Diese Untergliederung der Hauptgruppen, hier beispielhaft aufgeführt für Hauptgruppe 6 – Tunnel (geschlossene Bauweise), weist dabei folgende Struktur auf:⁴⁵

- Gruppe 61: Baugruben, Voreinschnitte, Tunnelausbruch, Wasserhaltung, Bauwerkshinterfüllung
- Gruppe 62: Entwässerung, Rückhaltebecken
- Gruppe 63: Gründungen, Baugrubensicherungen, Ausbruchsicherungen, Tunnelaußenschale

⁴² Die RAB-BRÜ wurde 1995 in die RAB-ING (Richtlinie für das Aufstellen von Bauwerksentwürfen für Ingenieurbauten) überführt und soll in den kommenden Jahren durch die RE-ING (Richtlinie für den Entwurf und die Ausbildung von Ingenieurbauten) ersetzt werden.

⁴³ Formblatt A – Übersicht und Verteilung der Kosten auf die Beteiligten [BMVBW (1995), Anhang 2 – S. 6 ff.]
Formblatt D – Zusammenstellung der Kosten der Hauptgruppe [BMVBW (1995), Anhang 2 – S. 9]
Formblatt E – Berechnung der Einzelkosten [BMVBW (1995), Anhang 2 – S. 10]

⁴⁴ vgl. BMVBW (1995)

⁴⁵ vgl. BMVBW (1995), Anhang 2 – S. 4

- Gruppe 64: Tunnelinnenschale, Portale, Betriebsgebäude, Beton, Stahlbeton, Verblendungen
- Gruppe 65: Gerüste, Schalwagen, Abbruch
- Gruppe 66: Innenausbau, Straßenaufbau
- Gruppe 67: Abdichtungen, Fugen, Oberflächenschutz
- Gruppe 68: Instandsetzung, Sonstiges
- Gruppe 69: Baustelleneinrichtung, Technische Bearbeitung, Verkehrssicherung

Mit der angeführten Struktur ist eine erste Einteilung in Kosten aus provisorischen bzw. dauerhaften Bauteilen oder Maßnahmen durchführbar. Auf Basis des Standardleistungskataloges (STLK) bzw. eines verwaltungsinternen Kostenberechnungskataloges (KBK) kann – abhängig vom jeweiligen Planungsstadium – eine detailliertere Kostenberechnung erfolgen.

Eine ähnliche gewerkeweise Kostenermittlung für Ingenieurbauwerke wird mit **DIN 276-4** angestrebt. Als Gegenstück zur DIN 276-1, die die Grundlage für die Kostenermittlung im Hochbau darstellt, wurde 2009 DIN 276-4 für Ingenieurbauwerke eingeführt. Deren Geltungsbereich grenzt sich dabei wie folgt ab:

„Diese Norm gilt für Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen, insbesondere für die Ermittlung und die Gliederung von Kosten. Sie erstreckt sich auf die Kosten für den Neubau, den Umbau und die Modernisierung von Ingenieurbauwerken sowie die damit zusammenhängenden projektbezogenen Kosten. Nutzungskosten sind nicht Gegenstand der Norm.“⁴⁶

Analog zur Einteilung nach DIN 276-1 ist auch für DIN 276-4 eine Abstufung der Kostengliederung von bis zu drei Ebenen vorgesehen. Ausgehend von der ersten Ebene erfolgt eine Einteilung in sieben Kostengruppen:⁴⁷

- 100 Grundstück
 - 200 Herrichten und Erschließen
 - 300 Bauwerk – Baukonstruktionen
 - 400 Bauwerk – Technische Anlagen
 - 500 Außenanlagen
 - 600 Ausstattung und Kunstwerke
 - 700 Baunebenkosten
- } Bauwerkskosten

Die Einführung von DIN 276-4 erfolgte unter anderem vor dem Hintergrund, dass eine Bestimmung der anrechenbaren Kosten für die Ermittlung der Planungskosten von Ingenieurbauwerken entsprechend der HOAI systematischer und nachvollziehbarer möglich wird.⁴⁸

Mit den beiden normativen Regelungen (RAB-ING und DIN 276-4) liegen aktuell zwei unterschiedliche Werke zur Kostenplanung vor. Bisher geführte Gespräche mit Planungsabteilungen für Tunnelbauwerke aus der öffentlichen Verwaltung lassen erkennen, dass

⁴⁶ DIN 276-4 (2009), S. 4

⁴⁷ vgl. DIN 276-4 (2009), S. 4

⁴⁸ vgl. FAHRENBRUCH (2010), S. 6

DIN 276-4 für die eigentliche Kostenplanung von Tunnelbauwerken bislang kaum Anwendung findet. Hier wird von Seiten der öffentlichen Auftraggeber weiterhin auf eine Kostenerhebung nach RAB-ING bzw. AKS abgestellt,⁴⁹ auch vor dem Hintergrund, dass die Kosten für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen (EWS, BVWP usw.) entsprechend der Kostenstruktur aus der AKS zu bestimmen sind und diese in der vorliegenden Form für die späteren Planungsphasen lediglich fortgeschrieben werden müssen.

Durch die sehr weitreichende Aufteilung der Kosten und der Möglichkeit der Kostenfortschreibung entsprechend der Planungstiefe liefern sowohl die AKS als auch DIN 276-4 erste Ansätze zur Erfassung und Strukturierung der Gesamtkosten von Tunnelbauwerken. In vielen Fällen dienen diese als Entscheidungskriterium über die weiteren Planungsschritte. Der Anwendungsrahmen und die darin vorgegebenen Kostenstrukturen beschränken sich jedoch auf die Prognose der zu erwartenden Herstellkosten. Eine Einbeziehung von Folgekosten (Betriebs- oder Unterhaltskosten) zur ganzheitlichen Kostenplanung ist weder für die AKS, der RAB-BRÜ bzw. RAB-ING noch für DIN 276-4 vorgesehen. Vergleichbare Vorschriften, wie sie bereits für den Hochbau mit DIN 18960 – Nutzungskosten im Hochbau bzw. GEFMA 200 – Kosten im Facility Management vorliegen, sind für Tunnelbauwerke bislang nicht veröffentlicht.

2.1.1.4 Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV)

Resultieren aus der Errichtung, Erneuerung oder dem Umbau von Kreuzungsbereichen der Verkehrsinfrastruktur unterschiedlicher Baulasträger (z. B. Straße und Schiene) Mehrkosten oder Einsparungen für den Unterhalt des jeweils anderen Verkehrsträgers, so hat ein finanzieller Ausgleich unter den Kreuzungsbeteiligten zu erfolgen. Hierzu ist mit Hilfe der Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV) der Mehraufwand aus Inspektion, Wartung, Instandhaltung und Ersatz der Kreuzungsanlage, in Form eines einmaligen Ablösebetrages, zu bestimmen. Dieser ergibt sich aus der Differenz der kapitalisierten Erhaltungskosten (Summe aus Erneuerungs- und Erhaltungskosten) des neu zu errichtenden (E_{neu}) und des bestehenden (E_{alt}) Bauwerks.⁵⁰

$$A = E_{neu} - E_{alt} \quad \text{für } E_{neu} > E_{alt} \quad (2.1)$$

$$A = E_{alt} - E_{neu} \quad \text{für } E_{neu} < E_{alt} \quad (2.2)$$

Als Grundlage für die Bestimmung der Erhaltungskosten ist ein Fiktiventwurf für die zukünftige Erneuerung der zu errichtenden baulichen Anlage aufzustellen. Bei einem Umbau existierender Bauwerke ist jeweils ein Entwurf für die zukünftige Erneuerung der vorhandenen baulichen Anlage und für die zukünftige Erneuerung der geänderten baulichen Anlage anzufertigen.

Die Erneuerungskosten (K_e) bestimmen sich aus den reinen Baukosten, den Kosten für Abbruch, Behelfszustände, Betriebserschwernisse, Umleitungsmaßnahmen und Sicherungsposten sowie den Verwaltungskosten der Fiktiventwürfe. Die jährlichen Unterhaltskosten ergeben sich als pauschaler Prozentsatz (p) der Kosten zur Ermittlung der Unterhaltskosten (K_u), die sich aus den reinen Baukosten und den anrechenbaren Verwaltungskosten zusammensetzen. Kosten, die lediglich im Zuge der Errichtung bzw. Ände-

⁴⁹ vgl. BMVBS (2010)A, Teil 5 – TVB-Straßen, Seite 8 bzw. SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER (2012), S. 1022

⁵⁰ vgl. BMVBS (2010)B

rung anfallen, jedoch für eine spätere Erneuerung nicht weiter zu berücksichtigen sind (z. B. Kosten für Vortriebssicherung), bleiben bei der Bestimmung der Erneuerungskosten außen vor.

Die theoretischen Nutzungsdauern der einzelnen Bauteile sind, ebenso wie der prozentuale Ansatz für die jährlichen Unterhaltskosten, den beiliegenden Tabellenwerken zu entnehmen (Tabelle 2.3). Diese sind unabhängig von der tatsächlichen Nutzungsdauer bzw. dem vorhandenen Ausstattungsgrad anzusetzen. Die Restnutzungsdauer (n) ergibt sich aus dem Zeitraum von Ablösezeitpunkt bis zur nächsten theoretischen Erneuerung, unabhängig vom Zustand der Anlage.

Tabelle 2.3: Theoretische Nutzungsdauer (m) und Prozentsätze (p) der jährlichen Unterhaltskosten⁵¹

lfd. Nr.	Bauwerksteil	Theoretische Nutzungsdauer m [Jahre]	jährliche Unterhaltskosten p [v. H.]
1	2	3	4
2.	Tunnel		
2.1	Herstellung in geschlossener Bauweise		
2.1.1	mit Entwässerungsanlagen	130	0,9
2.1.2	ohne Entwässerungsanlagen	130	0,6
2.2	Herstellung in offener Bauweise	90	0,6
2.3	Betriebstechnische und verkehrstechnische Ausstattungen für Straßentunnel (Beleuchtung, Lüftung, Sicherheitseinrichtungen, zentrale Anlagen, Wechselverkehrszeichen für dynamische Geschwindigkeitsbeschränkungen und Fahrstreifensignalisierung, Schranken (vor dem Tunnelportal) usw.)	20	2,0

Die Bestimmung der Ablösebeträge für Straßentunnel hat getrennt nach Bauwerk und technischer Ausstattung zu erfolgen. Zusätzliche Betriebskosten, beispielsweise Energiekosten für die Tunnelbeleuchtung, sind als jährliche Kosten gesondert zu bestimmen, zu kapitalisieren und dem jeweiligen Untersuchungsgegenstand (Bauwerk oder technische Ausstattung) zuzuschlagen.

Mit der ABBV und den darin enthaltenden Tabellen liegen allgemeingültige Ansätze für theoretische Nutzungsdauern sowie der Unterhaltskosten für Ingenieurbauwerke und deren Bestandteile vor. Allerdings handelt es sich bei der ABBV weder um ein Element der Kostenplanung noch um eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung. Mit der implementierten Vorgehensweise wird eine wirtschaftliche Optimierung einer baulichen Anlage nicht angestrebt. Vielmehr erfolgt durch das Aufstellen fiktiver Bauwerksentwürfe und der darauf basierenden Kostenermittlung die Bildung eines abstrakten Ablösungsbetrages. Die fehlende Einbeziehung wirklichkeitsnaher Werte für die Nutzungsdauern sowie differenzierter Werte für den Unterhalt der einzelnen Bauwerksbestandteile führt zu einer weiteren Abstraktion der Gesamtkosten.

⁵¹ BMVBS (2010)B, S. 11

2.1.1.5 Exkurs HVA F-StB / HOAI

Die Grundlage über Umfang und Planungstiefe, sowohl für die Kostenplanung nach AKS bzw. RAB-ING als auch nach DIN 276-4, wird für Straßen und Ingenieurbauwerke durch das Handbuch für die Vergabe und Ausführung von freiberuflichen Leistungen im Straßen- und Brückenbau (HVA F-StB) gelegt.⁵²

Neben den Richtlinien für das Aufstellen von Verträgen und die Durchführung von Vergabeverfahren enthält das Handbuch allgemeine Vertragsbedingungen und Mustertexte, die den Leistungsumfang für die Planungsleistungen vollumfänglich beschreiben sollen. Die Honorargestaltung, inkl. der zugehörigen Beschreibung der Grundleistungen, basiert auf der HOAI.

Im Hinblick auf die Kostenplanungen hat der beauftragte Planer im Zuge seiner Planungen lediglich die Herstellkosten – in Abhängigkeit von der Planungsphase – zu bestimmen. Eine Ermittlung weiterführender Folgekosten ist bislang in den enthaltenen Mustertexten nicht als Grundleistung des Planers vorgesehen. Lediglich Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, unter Einbeziehung der EWS oder des BVWP 2003⁵³, sind im Rahmen der Vorplanung vorzunehmen.

Auch die das Honorar bestimmenden Grundleistungen im Leistungsbild Ingenieurbauwerke gemäß § 43 HOAI umfassen ausschließlich die Erfassung der Herstellkosten im Zuge der Kostenplanung. Weiterführende Nachhaltigkeitsuntersuchungen im Rahmen der Planungen von Verkehrswegen bzw. Ingenieurbauwerken gilt es als besondere Leistungen gesondert zu beauftragen.⁵⁴

Eine ganzheitliche Kostenplanung (Erst- und Folgekosten) und eine darauf aufbauende Optimierung sind in den Regelwerken zur Beschreibung des Leistungsumfangs des Planers bislang nicht verbindlich vorgesehen.

2.1.2 Leitfäden und Richtlinien zur Reduzierung der Kosten von Tunnelbauwerken

Neben den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, die vor allem zur Bewertung der gesellschaftlichen Vorteilhaftigkeit der Baumaßnahmen Anwendung finden, wurde in den letzten Jahren eine Vielzahl an Leitfäden und Richtlinien veröffentlicht, die Bauherrn und Planer bei der Kostenoptimierung von Tunnelbauwerken unterstützen sollen. Entsprechend der verfolgten Zielstellung wird dabei eine Reduzierung der Herstellkosten mit bzw. ohne Einbeziehung der Betriebskosten angestrebt.

Die wesentlichen Leitfäden und Richtlinien, die eine übergeordnete Erfassung und Optimierung der Kosten anstreben, umfassen

- Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“⁵⁵,
- Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln⁵⁶ sowie
- Wirtschaftliche Aspekte bei Tunnelbauwerken in frühen Planungsphasen⁵⁷.

Nachfolgend werden diese kurz erläutert und auf eine Umsetzbarkeit einer ganzheitlichen Kostenoptimierung und den dazu notwendigen Kriterien untersucht.

⁵² vgl. BMVBS (2010)A, Teil 2

⁵³ siehe Erläuterungen EWS – Abs. 2.1.1.2 bzw. BVWP (2003) – Abs. 2.1.1.1

⁵⁴ vgl. HOAI (2013), § 43 sowie Anlage 12

⁵⁵ vgl. BMVBW (1998)

⁵⁶ vgl. BMVBW (2000)

⁵⁷ vgl. HSVV (2006)

2.1.2.1 Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“

Der Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“ wurde entwickelt, um die vor allem für oberflächennahe Tunnelbauwerke alternative Lösung eines Einschnittes, Galeriebauwerkes, einer Einhausung o. ä. aus wirtschaftlicher Sicht prüfen und bewerten zu können.⁵⁸ Der Leitfaden soll dafür ein transparentes und nachvollziehbares Vorgehen dokumentieren, mit dem sowohl ökonomische als auch nicht monetäre Kriterien in den Entscheidungsprozess einbezogen werden. Die vorgegebenen Kriterien sind dabei bewusst nicht abschließend zusammengestellt. Vielmehr stellen die im Leitfaden enthaltenen Kriterien einen ersten Ansatz dar, der auf die jeweils vorliegenden Projektbedingungen anzupassen ist.

Bei dem enthaltenen Bewertungsverfahren handelt es sich um ein Verfahren, das – angelehnt an die Methodik des BVWP bzw. EWS – monetäre und nichtmonetäre Kriterien in die Entscheidungsfindung einbezieht. Das Verfahren vereint die Kapitalwertmethode (für die rein monetären Kriterien) mit einer Nutzwertanalyse (für nicht monetäre Kriterien) zu einer Kostenwirksamkeitsanalyse.

Im Leitfaden ist ein Ablaufschema zur Durchführung der Bewertung alternativer Lösungsansätze integriert, an dessen Ende eine Bewertungsmatrix steht, die zur Planungsempfehlung „Einschnitt oder Tunnel“ führt. Als Bewertungsgröße der Unterkriterien dienen

- direkte monetäre Größen (z. B. aus Marktpreisen),
- indirekte monetäre Größen (z. B. aus vergleichbaren Bauwerken),
- nicht-monetäre, zahlenmäßige Größen (aus nicht-monetären Maßeinheiten) und
- verbale Bewertungen (Darstellung von Vor- bzw. Nachteilen).

Die Ermittlung der Kosten als monetäre Größe basiert auf den EWS⁵⁹ respektive auf der Kostenaufstellung entsprechend der AKS⁶⁰. Es wird dabei zwischen Kosten für den Unterhalt, für die Instandsetzung und den Betrieb unterschieden.

Abschließend werden alle, auch die in monetärer Form vorliegenden Werte (Baukosten, Grunderwerbskosten, jährliche Investitionskosten, laufende Kosten und Barwert nach 20 Jahren), in eine Bewertung der Form „++“ (für „beste Zielerreichung“) und „--“ (für „schlechteste Zielerreichung“) überführt. Hieraus leiten sich Rangfolgen für jedes einzelne übergeordnete Kriterium ab, die in der Summe als Entscheidungsgrundlage dienen.

Der Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“ unterscheidet zwischen Kosten für den Unterhalt, die Instandsetzung und den Betrieb. Allerdings werden keine Ansätze zur Verfügung gestellt, welche Folgekosten zu berücksichtigen sind und wie diese strukturiert und projektspezifisch bestimmt werden können. Durch die Beschränkung auf einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren bleiben zudem wesentliche Folgekosten (z. B. Erneuerung der technischen Ausstattung) außen vor. Die Nutzungsdauer als ein entscheidender Faktor zur Bestimmung der Gesamtkosten wird letztlich nur bedingt einbezogen. Durch die abschließende Überführung der monetären Größen in eine Bewertungsskala in der Form „++“ bis „--“ und der Rangfolgenbildung gehen vorhandene Gewichtungen verloren.⁶¹ Eine auf ökonomischen Kriterien beruhende Optimierung des zu planenden Bauwerkes kann hierdurch nur bedingt umgesetzt werden.

⁵⁸ vgl. BMVBW (1998)

⁵⁹ siehe Erläuterungen zu EWS – Abs. 2.1.1.2

⁶⁰ siehe Erläuterungen zu AKS, RAB-ING, DIN 276-4 – Abs. 2.1.1.3

⁶¹ Beispielsweise gilt 5 € < 10 € und 5 € < 6 €, die Gewichtung 6 € < 10 € würde dabei aber verloren gehen.

2.1.2.2 Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln

Der Tunnelquerschnitt hat wesentlichen Einfluss sowohl auf die Herstell- als auch auf die Betriebs- und Unterhaltskosten. Das zuständige Bundesministerium (BMVBW) stellt mit dem „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“ eine Methodik vor, die eine Bestimmung des aus ökonomischer Sicht geeignetsten Tunnelquerschnitts ermöglicht.⁶² Im Wesentlichen handelt es sich hierbei um die Beantwortung der Frage, ob die zusätzliche Anordnung eines Standstreifens wirtschaftlich sinnvoll ist.

Wie vorgelagerte Untersuchungen zeigen, erlauben die geringeren Unfallkenngrößen in Tunnelbauwerken (im Vergleich zur freien Strecke) eine Reduzierung des Regelquerschnitts und den Verzicht auf einen Standstreifen. Ausgangspunkt für die Planung von Tunnelbauwerken ist deshalb ein gegenüber der vorgelagerten Strecke abgeminderter Straßenquerschnitt ohne Standstreifen.

Aufgrund von verschiedenen Randbedingungen (z. B. der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke oder der Längsneigung im Tunnel) kann es aus volkswirtschaftlicher Sicht allerdings sinnvoll sein, den Tunnelquerschnitt um einen Standstreifen zu erweitern. Für eine entsprechende Einschätzung liefert das vorgestellte Verfahren Ansätze, die zu erwartenden Kosten und Nutzen zu bestimmen und gegenüberzustellen. Als Entscheidungsgröße dient ein Nutzen-Kosten-Verhältnis (NKV) aus den ersparten Verkehrskosten (Nutzen) und den zusätzlichen Baulastträgerkosten (Kosten). Die Kosten bestimmen sich aus der Differenz der „mittleren jährlichen Baulastträgerkosten“⁶³ der zu untersuchenden Tunnelquerschnitte (mit und ohne Standstreifen), wobei folgende Kostenkomponenten Berücksichtigung finden:

- Tunnelrohbauposten
- Fahrbahnkosten
- Ausstattungskosten (ausschließlich bei Bewertung RQ 26 T / 26 t)

Die Rohbauposten wurden in einem Forschungsvorhaben an der Ruhr-Universität Bochum – in Kooperation mit der STUVA⁶⁴ – über fiktive Ausschreibungen unterschiedlicher Tunnelbauwerke (Länge, Bauweise, Geologie usw.) zusammen mit Baufirmen erhoben und über realisierte Projekte verifiziert.⁶⁵

Im Zusammenhang mit dem o. g. Forschungsvorhaben wurden Diagramme entwickelt, mit deren Hilfe sowohl die Nutzen- als auch weitere Kostenkomponenten für das NKV bestimmt werden können. Die ersparten Verkehrskosten als Nutzenkomponenten bestimmen sich aus den „monetarisierbaren Vorteilen“⁶⁶ des Tunnelnutzers. Sie ergeben sich aus geringeren Kfz-Betriebskosten, Unfallkosten usw. Die aus den Diagrammen abzuleitenden Kostenkomponenten beschränken sich auf die zusätzlichen jährlichen Betriebskosten. Sie umfassen die Mehrkosten aus der Tunnellüftung (größerer Querschnitt – geringerer Energiebedarf) und der Beleuchtung (größerer Querschnitt – größerer Energiebedarf). Weitere Kostenelemente (Kosten für betriebstechnische Ausstattung, Sicherheitseinrichtungen usw.) bleiben bei der Bewertung außen vor, da deren Ausprägung nicht von der Wahl des Querschnitts abhängig ist.

⁶² vgl. BMVBW (2000)

⁶³ BMVBW (2000), S. 5

⁶⁴ Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA)

⁶⁵ vgl. STUVA (1997); BRILON, LEMKE (2000)

⁶⁶ BMVBW (2000), S. 5

Beim Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln beschränkt sich die Bewertung der Kosten auf die Bestandteile, die durch die Wahl des Tunnelquerschnitts wesentlich beeinflusst werden. Das Ziel einer vollumfänglichen Bewertung des Gesamtbauwerkes wird dadurch nicht verfolgt. Andere Einflussparameter, wie z. B. die zulässige Höchstgeschwindigkeit⁶⁷, fließen nicht in die Bewertung mit ein. Eine eingeschränkte Optimierung hinsichtlich der Wahl des Tunnelquerschnitts wird dadurch zwar möglich. Eine ganzheitliche Reduzierung der Kosten kann aufgrund des begrenzten Untersuchungsgegenstands und -umfangs allerdings nicht erfolgen.

2.1.2.3 Wirtschaftliche Aspekte bei Tunnelbauwerken in frühen Planungsphasen

Durch das Hessische Landesamt für Straßen- und Verkehrsverwaltung (HSVV) wurde die Planungshilfe „Wirtschaftliche Aspekte bei Tunnelbauwerken in frühen Planungsphasen“ herausgegeben.⁶⁸ Sie soll den Projektbeteiligten die wirtschaftlichen Folgen von Planungsentscheidungen verdeutlichen. Ziel ist es, das Tunnelbauwerk bereits im frühen Planungsstadium aus ökonomischer Sicht möglichst optimal auszugestalten, da der Grad der Beeinflussbarkeit der Kosten mit zunehmendem Projektfortschritt sinkt. Die signifikanten Einflussfaktoren, sowohl der Bauwerks- als auch der Betriebskosten, sollen dafür aufgezeigt werden (Abbildung 2.1).

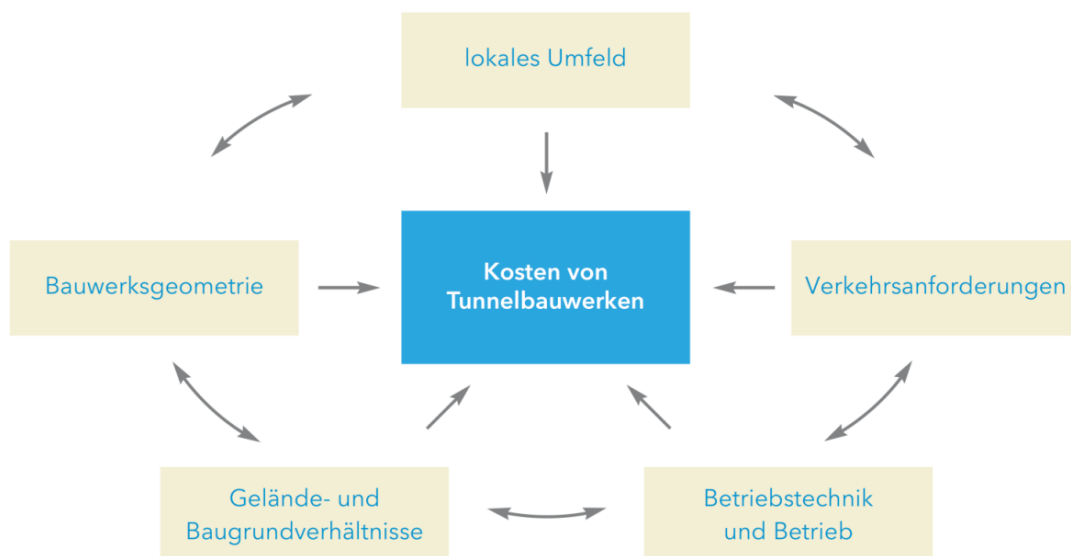


Abbildung 2.1: Einflussfaktoren auf die Kosten von Tunnelbauwerken⁶⁹

Ausgangsbasis für die Bestimmung der wesentlichen Faktoren stellt ein (fiktiver) Referenz-tunnel in Spritzbetonbauweise dar. Dessen Errichtungskosten wurden auf Basis von realisierten Projekten sowie Preisangaben von verschiedenen Bauunternehmen bestimmt. Die mittleren spezifischen Baukosten belaufen sich für den Referenz-tunnel auf 14.000 bis 16.000 €/l/m Tunnel. Darin berücksichtigt sind neben den Kosten für den Rohbau auch die Kosten der Technischen Ausstattung.

⁶⁷ vgl. BMVBS (2006)B, S. 4

⁶⁸ vgl. HSVV (2006)

⁶⁹ HSVV (2006), S. 15

Zur Abschätzung der Auswirkungen wurden, ausgehend vom Referenztunnel, folgende Parameter eingehender untersucht:

- Bauwerksgeometrie
 - Tunnellänge (hinsichtlich Rohbau, Flucht- und Rettungssystem, Pannenbuchten, Technische Ausstattung und Betriebskosten)
 - Steigung (hinsichtlich Sicherheitsmaßnahmen und Entwässerung)
 - Tunnelquerschnitt (hinsichtlich Querschnitt, Anzahl der Röhren und Querschnittsform)
- Gelände und Baugrund
 - Topographie (hinsichtlich Bauweise, Gebirgsüberdeckung (seitlich, Firste), Portallage)
 - Gebirgseigenschaften (hinsichtlich Gebirgsfestigkeit, Gebirgsverhältnisse, Umwelttechnische Aspekte, Ausbruchmaterial und Arbeitssicherheit)
 - Grund- und Bergwasser (hinsichtlich Bau- und Betriebsphase)
- Umweltfaktoren
 - Gebäude und Verkehrswege (hinsichtlich Setzungen, Unterfahrungen, Randbebauung und Aufrechterhaltung von Verkehrswegen)
 - Nachbarbebauung, Lärm und Erschütterungen

Als Bezugspunkt dienen in allen Fällen die Herstellkosten für den Referenztunnel. Hieraus wird aufgezeigt, dass sich die spezifischen Rohbaukosten (€/lfm) nahezu proportional zur Tunnellänge verhalten. Die Kosten für die Tunnelausstattung hingegen nehmen, bedingt durch die wachsenden Sicherheitsanforderungen, kaskadenartig mit steigender Tunnellänge zu.

Bei den aufgezeigten Auswirkungen handelt es sich im Wesentlichen um Einflussfaktoren für die Bauwerkskosten. Die jährlichen Betriebskosten werden lediglich grob abgeschätzt (100 bis 150 €/lfm). Eine genauere Spezifizierung oder eine Bewertung möglicher Parameteränderungen für die laufenden Kosten wird nicht vorgenommen.

Da die vorliegende Planungshilfe nur Ansätze zur Abschätzung der Auswirkungen möglicher Ausgestaltungen von Tunnelbauwerken liefert, ist eine Kostenplanung bzw. Wirtschaftlichkeitsuntersuchung auf Basis der verwendeten Kostenkennwerte explizit nicht angeraten. Ein Ansatz als Basis für Variantenuntersuchungen ist ebenso nicht möglich.⁷⁰

Durch das Aufzeigen wesentlicher Einflussparameter wird erstmalig eine gezielte ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken angestrebt. Die untersuchten Parameter beschränken sich auf Veränderungen der Herstellkosten. Die Rohbaukosten stehen dabei im Vordergrund. Einflussfaktoren für die Folgekosten (Betrieb und Unterhalt) werden einzig für die Tunnellänge – ohne direkte Bestimmung quantifizierbarer Werte – aufgezeigt. Zudem fehlt es an einer Darstellung der wirtschaftlichen Folgen, bei gleichzeitiger Veränderung mehrere Parameter, z. B. Tunnellänge, Grundwasser und Geologie.

Die Beschränkung auf bergmännisch hergestellte Tunnelbauwerke in Spritzbetonbauweise grenzt alternative Bauweisen (offene Bauweise, maschinell aufgefahrene Tunnelbauwerke) als Anwendungsbereiche aus. Eine zielgerichtete Optimierung der Gesamtkosten eines Tunnelbauwerkes (mit Erst- und Folgekosten) kann mit dem vorliegenden Leitfaden letztlich nicht umgesetzt werden.

⁷⁰ vgl. HSVV (2006), S. 6

2.1.2.4 Aspekte der Wirtschaftlichkeit in weiteren Regelwerken bzw. Leitfäden

Neben den oben angeführten Richtlinien und Handlungsanweisungen existiert noch eine Vielzahl an weiteren Ansätzen, die eine Reduzierung der Kosten von Tunnelbauwerken als Ziel verfolgen. Dabei handelt es sich um abgegrenzte Ansätze, die die Wirtschaftlichkeit singulärer Bauelemente bzw. Prozesse verfolgen. Die einzelnen Regelwerke bzw. Leitfäden sind nachfolgend beispielhaft zusammengestellt:

- Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)⁷¹
- Bauwerksmanagement System (BMS)⁷²
- DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen⁷³
- Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken (RI-ERH-ING)⁷⁴
- Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen⁷⁵
- Richtlinie zur Ermittlung und Verrechnung von Kosten im Straßenbetriebsdienst an Bundesfernstraßen⁷⁶
- Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT)⁷⁷
- Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln (RI-BWD-TU)⁷⁸

Im Rahmen der aufgeführten Richtlinien bzw. Leitfäden werden allgemeingültige Aussagen oder ganz spezielle Bauelemente bzw. Prozesse angesprochen. Eine ganzheitliche Betrachtung sowie eine Einbeziehung möglicher Einflüsse auf andere Bereiche bleiben dabei außen vor. Auf eine detaillierte Darstellung der einzelnen Ansätze wird deshalb an dieser Stelle verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen. Sofern die Regelwerke im Zuge dieser Arbeit weitere Berücksichtigung finden, wird an den entsprechenden Stellen vertieft auf diese eingegangen.

2.1.3 Öffentlich-Private Partnerschaft – Public-Private Partnership

In Deutschland hat sich durch die immer knapperen Finanzmittel und die Sparmaßnahmen der öffentlichen Haushalte die Öffentlich-Private Partnerschaft (ÖPP)⁷⁹ als alternative Form der Projektrealisierung etabliert. Dabei überträgt der öffentliche Bauherr einem privaten Unternehmer, abhängig vom gewählten Vertragsmodell, die Leistungen für Planung, Finanzierung, Bau, Betrieb und Verwertung.⁸⁰ Durch die ganzheitliche Projektbetrachtung und -umsetzung wird ein Effizienzvorteil gegenüber der konventionellen Realisierung und dem Eigenbetrieb angestrebt. Dies wird im Wesentlichen dadurch begründet, dass durch die ganzheitliche Betrachtung eine Optimierung der Kosten über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes möglich wird.⁸¹

⁷¹ FGSV (2006)

⁷² HAARDT (2002); HOLST (2005)

⁷³ DIN 1076 (1999)

⁷⁴ BMVBS (2013)A

⁷⁵ BMVBW (2004);

siehe hierzu auch Musterleistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf der Konzessionsstrecke [BMVBW (2002)]

⁷⁶ BMVBS (2006)A

⁷⁷ FGSV (2011)

⁷⁸ BAST (2007)

⁷⁹ auch bekannt als Public-Private Partnership (PPP)

⁸⁰ Es werden folgende Vertragsmodelle unterschieden: Erwerber-, Inhaber-, Leasing-, Miet-, Contracting-, Konzessions- und Gesellschaftsmodell. [vgl. BMVBS (2006), S. 9]

⁸¹ vgl. BMVBS (2006)c, S. 6

Ausschlaggebendes Kriterium für die Realisierung eines Projektes in Form eines ÖPP-Projektes ist dessen ökonomische Vorteilhaftigkeit. Hierfür sind vergleichende Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von konventioneller und alternativer Realisierungsvariante vorzunehmen. Mit dem Leitfaden „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei PPP-Projekten“ wurden Standards für eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Beschaffungsvarianten entwickelt. Der konventionelle Vergleichswert „Public Sector Comparator“ (PSC), gebildet aus den Kosten und Erlösen eines konventionell realisierten Referenzprojektes, dient hierbei als Vergleichsmaßstab.⁸²

Das im Leitfaden vorgeschlagene Vorgehen setzt sich aus vier Phasen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zusammen (Abbildung 2.2).

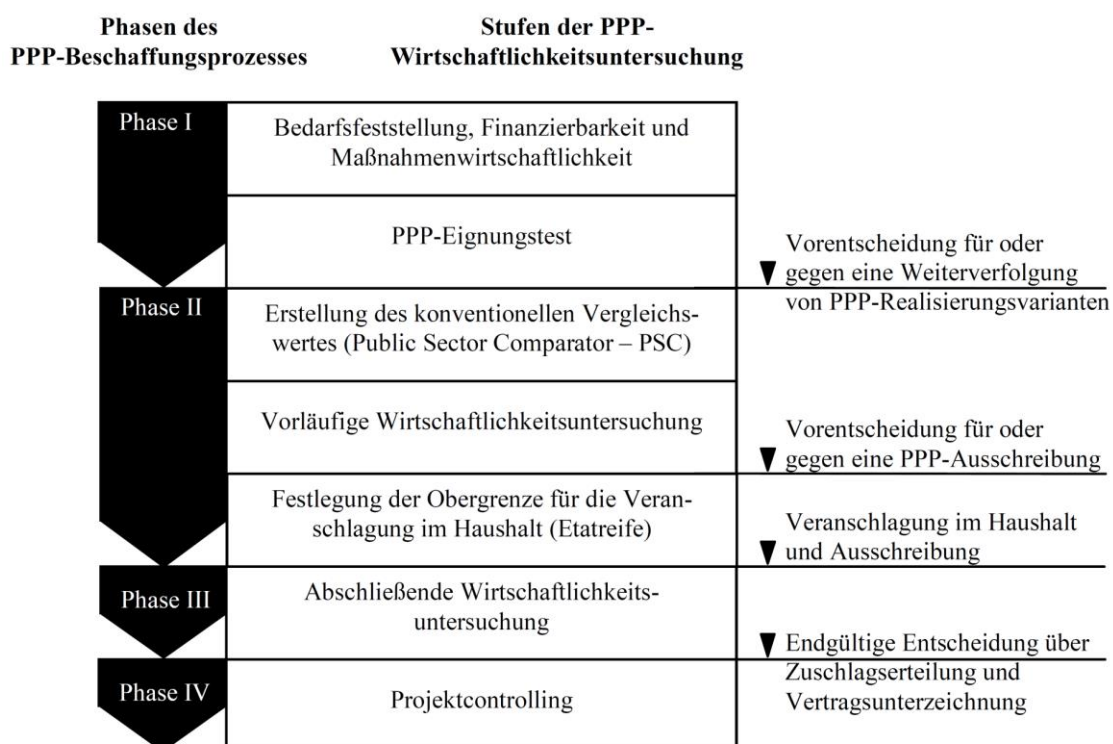


Abbildung 2.2: Phasen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung zur Umsetzung von PPP-Projekten⁸³

Die zur Ermittlung vorgesehenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen beziehen alle Kosten und Erlöse über den gesamten Lebenszyklus ein:⁸⁴

- Investitionsausgaben (Planung und Bau)
- Finanzierungskosten
- Betriebs- und Instandhaltungskosten
- Transaktions- und Verwaltungskosten
- Risikokosten
- Erlöse aus Gebühren bzw. Nutzungsentgelten
- Kosten bzw. Erlöse aus Verwertung

⁸² vgl. BPPP (2007), S. 16; SCHWEIBENZ, CLAUSEN (2010), S. 100 f.

⁸³ BMVBS (2006)c, S. 7

⁸⁴ vgl. BMVBS (2006)c, S. 23

Der Betrachtungszeitraum richtet sich dabei nicht nach der zu erwartenden Lebensdauer des Bauwerkes. Vielmehr umfasst dieser die vorgesehene Vertragslaufzeit von i. d. R. 20 bis 30 Jahren. Zur Vergleichbarkeit der in diesem Zeitraum anfallenden Zahlungen wird auf dynamische Verfahren der Kapitalwertmethode zurückgegriffen.

In Phase III werden im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung die vorher abgeschätzten Kosten und Erlöse aus der PPP-Projektvariante durch die im Zuge der Ausschreibung erhobenen Kostengruppen der einzelnen Bieter ersetzt. Diese basieren auf Vergabeunterlagen, in denen die zu erbringende Leistung für alle eindeutig und erschöpfend zu beschreiben ist.

In der abschließenden Gegenüberstellung der Gesamtkosten erfolgt eine Abwägung pro bzw. contra hinsichtlich der Ausführung als ÖPP-Projekt. Dabei werden auch die Effizienzgewinne, die aus der alternativen Projektrealisierung resultieren, ausgewiesen.⁸⁵

Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung im Rahmen von ÖPP-Projekten wird das Ziel verfolgt, das jeweilige Bauwerk – im Vergleich zur konventionellen Bauweise – ökonomischer umzusetzen. Dabei ruht der Fokus nicht zwangsläufig auf einer ganzheitlichen Optimierung des Bauwerkes. Vielmehr ist den Bietern daran gelegen, das eigene Angebot möglichst knapp unterhalb des PSC zu platzieren, um die Wirtschaftlichkeit aus Auftragnehmersicht zu optimieren und das Projekt dennoch als ÖPP-Projekt realisieren zu können. Eine objektiv ganzheitliche Optimierung über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerkes ist mit der vorliegenden Methodik nicht umsetzbar, zumal der Betrachtungszeitraum der Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durch die Konzessionsdauer abgegrenzt ist. Der darüber hinausgehende Nutzungszeitraum (bei Tunnelbauwerken z. T. > 80 Jahre) bleibt in den Betrachtungen außen vor. Ein auf Gewinn ausgerichteter Unternehmer verfolgt aufgrund seiner eigenen Interessenslage das Ziel, hieraus weitere Einsparungen zu generieren, beispielsweise durch gezielte Auswahl der verwendeten Bauteile und Materialien und deren Nutzungsdauer, unter Einhaltung der vorgegebenen Qualitätskriterien.

2.1.4 Bewertung der praxisrelevanten Ansätze

Die aktuell in der Praxis angewendeten Verfahren zur Planung, Bewertung oder Analyse der Kosten von Straßentunneln ermöglichen vereinfachte bzw. begrenzte Betrachtungen hinsichtlich einer ökonomischen Optimierung. Häufig sind dabei Zielstellung bzw. Betrachtungsrahmen der verschiedenen Ansätze nicht auf eine ganzheitliche Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken ausgelegt. In den meisten Fällen ist die Kostenplanung auf die Herstellkosten beschränkt. Wie einer Querschnittsprüfung des Bundesrechnungshofes⁸⁶ aus dem Jahre 2007 zu entnehmen ist, wird der gesetzlichen Forderung nach Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Baumaßnahmen häufig nicht nachgekommen.⁸⁷ Bei über 80 % der untersuchten Maßnahmen wurde festgestellt, dass notwendige Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen nicht durchgeführt wurden.⁸⁸ Vielmehr ist es in der Praxis üblich, Entscheidungen auf Basis der Investitionskosten zu treffen. Daraus lässt sich schließen, dass eine lebensphasenübergreifende Denkweise bislang kaum Einzug in den Planungsprozess von Tunnelbauwerken gefunden hat.

⁸⁵ BMVBS (2006)c, S. 38

⁸⁶ Untersucht wurden finanzwirksame Maßnahmen in den Jahren 2000 bis 2003 mit einem Investitionsvolumen über 50.000 €. [vgl. BRH (2007), S. 125]

⁸⁷ Die Entsprechende Forderung ist unter § 7 der Bundeshaushaltsordnung (BHO) formuliert. vgl. BMF (2013)A, § 7

⁸⁸ vgl. BRH (2007), S. 125 ff.

Sofern in den Leitfäden bzw. Richtlinien weitergehende Betrachtungen (z. B. Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen) vorzunehmen sind, erfolgt eine Einbeziehung der Folgekosten oder auch der Nutzungsdauern als pauschale Kennwerte ohne projektspezifische Anpassung (siehe u. a. EWS 1997 oder ABBV). Ein gezieltes Ausnutzen von Substitutionsmöglichkeiten – unter Einbeziehung aller Kosten (Erst- und Folgekosten) – zur aktiven Optimierung der Gesamtkosten eines Bauwerkes kann dadurch nicht erfolgen. Entsprechende Vorgehensweisen stehen zudem den öffentlichen Haushaltsvorschriften entgegen. Beispielsweise ist ein zeitliches Vorziehen zukünftiger Haushaltsausgaben (höhere Investitionskosten bei reduzierten Folgekosten) nicht gestattet.⁸⁹

Hinderlich für eine phasenübergreifende Denkweise ist zudem eine kaum stattfindende konsistente Erfassung der tatsächlich anfallenden Kosten sowie der Lebensdauern der unterschiedlichen Bauteile während der Betriebsphase eines Tunnelbauwerkes. Der Bundesrechnungshof (BRH) stellte diesbezüglich fest, dass es an ausreichend entwickelten Systemen fehle, die eine entsprechende Kosten- und Leistungsrechnung der öffentlichen Verwaltung ermöglichen könnten.⁹⁰ Die in der öffentlichen Verwaltung bisher übliche kameralistische Buchführung erfüllt hierfür nicht die notwendigen Kriterien. Wie weiterführende Gespräche mit Tunnelbetreibern ergaben, werden die Daten – wenn überhaupt – betreiber- bzw. bauwerksübergreifend sehr unstrukturiert erhoben und aufbereitet.

Eine Dokumentation entsprechender Werte, wie dies z. B. im Hochbau mit Veröffentlichung und Fortschreibung der BKI-Datenbanken erfolgt ist, konnte im Zuge der Grundlagenrecherche nicht eruiert werden.⁹¹ Einzig die durch die PIARC in einer internationalen Studie erhobenen Kennzahlen wurden bislang veröffentlicht.⁹² Allerdings sind die erhobenen Werte nicht allgemeingültig anwendbar. Es fehlt an Angaben zu projektspezifischen Rahmenbedingungen (Baujahr, Bau- und Betriebsstandard usw.), die eine Nachvollziehbarkeit sowie die Vergleichbarkeit mit anderen Werten überhaupt erst erlauben. Eine Übertragung auf andere Bauwerke ist letztlich nicht möglich.

Bei der Anwendung lebenszyklusübergreifender Kostenbetrachtungen im Rahmen von ÖPP-Projekten erschweren die unterschiedlichen Interessenlagen von öffentlicher Verwaltung (ökonomisches Optimum über den gesamten Lebenszyklus) und Konzessionsnehmer (ökonomisches Optimum über den Konzessionszeitraum) eine ganzheitliche Optimierung bei der Projektumsetzung.

Die Untersuchung der praxisrelevanten Richtlinien und Leitfäden hat gezeigt, dass eine ganzheitliche sowie transparente und nachvollziehbare Kostenplanung und Optimierung bislang nicht möglich ist. Insbesondere die vollumfänglich Erfassung der Kosten, die Generierung von Optimierungsmöglichkeiten sowie die Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Kostenprognose werden in vielen Fällen nicht bzw. nur unzureichend umgesetzt (Tabelle 2.4).

Wie bereits unter Abs. 2.1 angeführt, liegen auch International keine entsprechenden Strukturen bzw. Vorgehensweisen vor (ausgenommen die Anweisungen der PIARC – siehe hierzu Abs. 2.2.5.4), die eine Umsetzung der Zielstellung hinsichtlich einer aktiven Kostenoptimierung für Tunnelbauwerke ermöglichen.

⁸⁹ vgl. GREINER, MAYER, STARK (2005), S. 181

⁹⁰ vgl. BRH (2007), S. 128

⁹¹ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER (2012), S. 1023

⁹² vgl. PIARC (1999)

Erläuterungen zur PIARC sind Abs. 2.2.5.4 zu entnehmen.

Tabelle 2.4: Bewertung der ökonomischen Betrachtungen in der Praxis

Kriterium Vorschrift Richtlinie Leitfaden		Ganzheitlichkeit			Transparenz Nachvollziehbarkeit	Detailierung	Anpassungsfähigkeit	konsistente Strukturen	Optimierungsmöglichkeit	Prognoseunsicherheiten
		Bauwerk	Phasen	Kosten						
Praxis	BWVP 2003	o	+	o	--	--	--	+	--	--
	EWS 1997	o	+	o	--	-	--	+	--	--
	AKS / RAB-ING	++	-	-	o	+	+	+	--	--
	DIN 276-4	++	-	-	+	++	++	++	--	--
	ABBV	+	+	o	o	-	-	+	--	--
	LF "Einschnitt oder Tunnel"	+	+	o	-	o	o	o	-	--
	Auswahl Straßenquerschnitt	+	+	+	o	o	o	o	o	--
	Wirtschaftliche Aspekte	o	-	o	o	-	-	--	+	--
	ÖPP-Modelle	++	+	++	+	+	+	o	--	+

Legende: ++ Kriterium vollumfänglich erfüllt
 + Kriterium gut erfüllt
 o Kriterium durchschnittlich erfüllt / nicht anwendbar
 - Kriterium nur bedingt erfüllt
 -- Kriterium nicht erfüllt

2.2 Ökonomische Betrachtungen für Tunnelbauwerke in der Forschung

Die Planung bzw. Prognose der Kosten von Tunnelbauwerken ist in unterschiedlichen Ausprägungen Bestandteil aktueller oder bereits abgeschlossener Forschungsvorhaben. Für die mit der vorliegenden Arbeit verfolgte Zielstellung sind folgende Themenschwerpunkte von Bedeutung:

- Kostenplanung für die Errichtung von Tunnelbauwerken (STEIGER (2009))
- Wirtschaftlichkeit von Strecken der Eisenbahninfrastruktur (DICKENBROK (2012))
- Kosten-Risiko-Analyse für Verkehrsinfrastrukturprojekte (NAUMANN (2007))
- Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken (SAUER UND FISCHER (2011, 2012, 2013); KAMARIANAKIS (2013); ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013))
- Lebenszykluskostenmodelle für Tunnelbauwerke (HASENAUER, STROHMEIER, MARK (1983); SISTENICH ET AL. (2012); HOLST (2012); PIARC (1999, 2012); VOGT (2012))

Zur Feststellung des Forschungsbedarfes werden wesentliche Forschungsarbeiten nachfolgend vorgestellt und hinsichtlich der Zielstellung einer ökonomischen Optimierung von Tunnelbauwerken einer kritischen Würdigung unterzogen.

2.2.1 Kostenplanung für die Errichtung von Tunnelbauwerken

Für die Planung von Tunnelbauwerken und der dabei anfallenden Kosten wurde bereits eine Vielzahl an Forschungsarbeiten veröffentlicht. Exemplarisch wird an dieser Stelle die Arbeit von STEIGER⁹³ eingehender erläutert.

Zur Erhöhung der Prognosesicherheit der Herstellkosten von Tunnelprojekten wurde ein IT-gestütztes, projektbezogenes Risiko-Modell (PRIMO) entwickelt. Unter Einbeziehung probabilistischer Ausgangsdaten erfolgt eine Prognose der Gesamtkosten sowie der zu erwartenden Bauzeit. Dabei wird auf die Methoden der Bayes'schen Netze (als Expertensystem) zur Modellierung der geologischen Gegebenheiten und der Monte-Carlo-Simulation zur mathematischen Implementierung von Eintrittswahrscheinlichkeiten zurückgegriffen.

Das entwickelte Risikomodell (PRIMO) setzt sich aus vier Grundmodellen zusammen:

- **Risikomanagementprozess** zur Identifizierung, Analyse und Berücksichtigung von Projektrisiken. Die Eingangsdaten können auf deterministischer oder probabilistischer Datengrundlage beruhen.
- **Geologie** zur Beschreibung der vorhandenen geologischen Situation und Einbindung von Bayes'schen Netzen sowie zur Ableitung geologischer Ereignisse und Risiken.
- **Bauprozess** zur Abbildung der Baukosten bzw. Bauzeit. Dabei werden deterministische und probabilistische Ausgangsgrößen angesetzt und die Baukosten (-zeit) aber auch Risikokosten (-zeiten) bestimmt. Ausgangsbasis ist die detaillierte Darstellung/Modellierung des Herstellungsprozesses und der möglichen Abweichungen (z. B. über Leistungswerte, Materialkosten usw.).
- **Längenschnitt** zur Zuordnung von Maßnahmen und deren Ergebnissen zu Homogenabschnitten. Aus der Gesamtdarstellung erfolgt die Bestimmung der Gesamtbaukosten und Gesamtbauzeit unter Einbeziehung auch bislang nicht behandelte, aber bereits erkannter Risiken.

Bei der vorliegenden Arbeit wird im Wesentlichen der Bauprozess – und im Detail der Vortriebsprozess – abgebildet und hieraus die Baukosten bzw. die Bauzeit bestimmt. Der Fokus liegt dabei auf einer besseren Vorhersagbarkeit von Kosten, Terminen und möglichen Risiken. Eine optimierte Bauwerksgestaltung oder auch die Kosten während der Nutzungsphase werden in die Untersuchungen nicht einbezogen. Das entwickelte Modell liefert Ansätze zur Kostenplanung für den eigentlichen Tunnel (Herstellkosten), die als Ausgangsbasis für eine Lebenszykluskostenberechnung dienen können.

2.2.2 Wirtschaftlichkeit von Strecken der Eisenbahninfrastruktur

Das von DICKENBROK entwickelte Modell verfolgt einen globalen Ansatz zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit kompletter Strecken der Eisenbahninfrastruktur – inkl. der dazugehörigen Infrastrukturbauwerke (Brücken, Tunnel, Bahnübergänge, Bahnhöfe usw.).⁹⁴

Trotz der Abweichung hinsichtlich des Untersuchungsgegenstands wird aufgrund der vergleichbaren Problemstellung untersucht, ob die entwickelten Ansätze auch auf Projekte der Straßeninfrastruktur übertragbar sind.

⁹³ vgl. STEIGER (2009)

⁹⁴ vgl. DICKENBROK (2012)

Das entwickelte Modell gliedert sich in vier Teilmodelle:

- Kosten Eisenbahnverkehrsunternehmen
- Erlöse Eisenbahnverkehrsunternehmen
- Kosten Eisenbahninfrastrukturbetreiber
- Erlöse Eisenbahninfrastrukturbetreiber

Das für die vorliegende Arbeit relevante Teilmodell „Kosten Eisenbahninfrastruktur“ dient zur Bestimmung der Kosten der einzelnen Bestandteile der Infrastruktur über ein Lebenszykluskostenmodell. Bedingt durch die Heterogenität ganzer Strecken wird dabei ein pauschaler Kostenansatz, bezogen auf einen Streckenkilometer, als nicht zielführend erachtet. Vielmehr werden neun Infrastrukturelemente als Ausgangsbasis für eine einheitliche Kostenstruktur und -kalkulation differenziert. Tunnelbauwerke finden dabei als eigenständiges Element gesondert Berücksichtigung.

Die Bestimmung der Gesamtkosten erfolgt mit Hilfe der Kapitalwertmethode als Grundlage des Lebenszykluskostenmodells. Die Kosten werden getrennt nach Investitionskosten und laufenden Kosten (Instandhaltung und Betriebsführung) erfasst und über Kostenkennwerte abgebildet. Die Ermittlung der Kosten umfasst allgemein die Kostenarten

- Investitionskosten als Kapitaldienst (über Abschreibung und Verzinsung als %-Satz der Herstellkosten [HK]),
- Instandhaltungskosten (über relativen Kostenansatz als %-Satz der HK),
- Betriebsführungskosten (über relativen Kostenansatz als %-Satz der HK) sowie
- Allgemeine Geschäftskosten (über relativen Kostenansatz als %-Satz der HK).

Ausgehend von einer Auswertung bereits existierender Bahntrassen und der zugehörigen Bauwerke wurden in einer vorgelagerten Forschungsarbeit von LIENAU⁹⁵ Nutzungszeiträume und relative Kostenansätze ermittelt. Für Tunnelbauwerke (zweigleisig) wurden pauschale Herstellkosten von 30.000 €/m und jährliche Instandhaltungskosten in Höhe von 0,1 % der Herstellkosten (= 30 €/m*a) bestimmt. Betriebsführungskosten (Strom, Reinigung usw.) wurden speziell für Tunnelbauwerke nicht erhoben, da diese bereits in den Kosten für Gleise, Weichen und Signale einbezogen wurden.

Der Ansatz einer eigenständigen Berücksichtigung von Tunnelbauwerken ist für die Optimierung der Kosten unerlässlich. Die Differenzierung entsprechend den vorgeschlagenen Kostenarten unterstützt die Transparenz, die für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung zwingend notwendig ist. Jedoch ermöglicht eine pauschale Berücksichtigung sowohl von Herstell- als auch von Folgekosten keine aktive Optimierung der Kosten für Tunnelbauwerke. Für eine entsprechende ökonomische Optimierung sind eine weitere Aufschlüsselung der Kostenarten sowie eine bauwerksspezifische Erhebung der Kosten anzustreben.⁹⁶ Durch die in Straßentunneln weitaus umfangreichere Tunnelausstattung sind zudem die Betriebskosten (Energie, Reinigung usw.) gesondert zu bestimmen und den einzelnen Bauelementen zu zuweisen.

⁹⁵ vgl. LIENAU (2006)

⁹⁶ Dazu notwendig ist eine vorgelagerte, dezidierte Erfassung und Auswertung der Kosten bestehender Tunnelbauwerke.

2.2.3 Kosten-Risiko-Analyse für Verkehrsinfrastrukturprojekte

Zur Steigerung der Prognosesicherheit der Kosten von Verkehrsinfrastrukturprojekten wurde von NAUMANN⁹⁷ ein Modell zur Kosten-Risiko-Analyse (KoRa-Modell) entwickelt, das neben Kosten auch Risiken in die Entscheidungsfindung zur Realisierung einbezieht. Im Vordergrund steht die Steigerung der Zielgenauigkeit der prognostizierten Kosten. Die mit Hilfe des Modells erfolgte Kostenermittlung dient als Ausgangsbasis für das Kostenmanagement und ist Teil des Projektcontrollings. Dazu werden im KoRa-Modell vier Teilmodelle konsekutiv durchlaufen:

- Kosten-Teilmodell
- Risiko-Teilmodell
- Kosten-Risiko-Teilmodell
- Risiko-Szenario-Teilmodell

Das Kostenmodell erfasst sämtliche Kosten über alle Lebensphasen in einer durchgängigen Kostenstruktur. Eine hierarchische Gliederung der Struktur erlaubt dabei eine Berücksichtigung der steigenden Informationsdichte mit voranschreitendem Planungsstand.

Im Risiko-Teilmodell werden, aufbauend auf dem jeweils vorliegenden Informationsstand, die Risiken identifiziert und im Hinblick auf die Kosten bewertet. Die Zusammenführung der Risiken erfolgt in einem projektspezifischen Risikokatalog. Darüber hinaus werden die einzelnen Risikofaktoren untereinander in Abhängigkeit gesetzt.

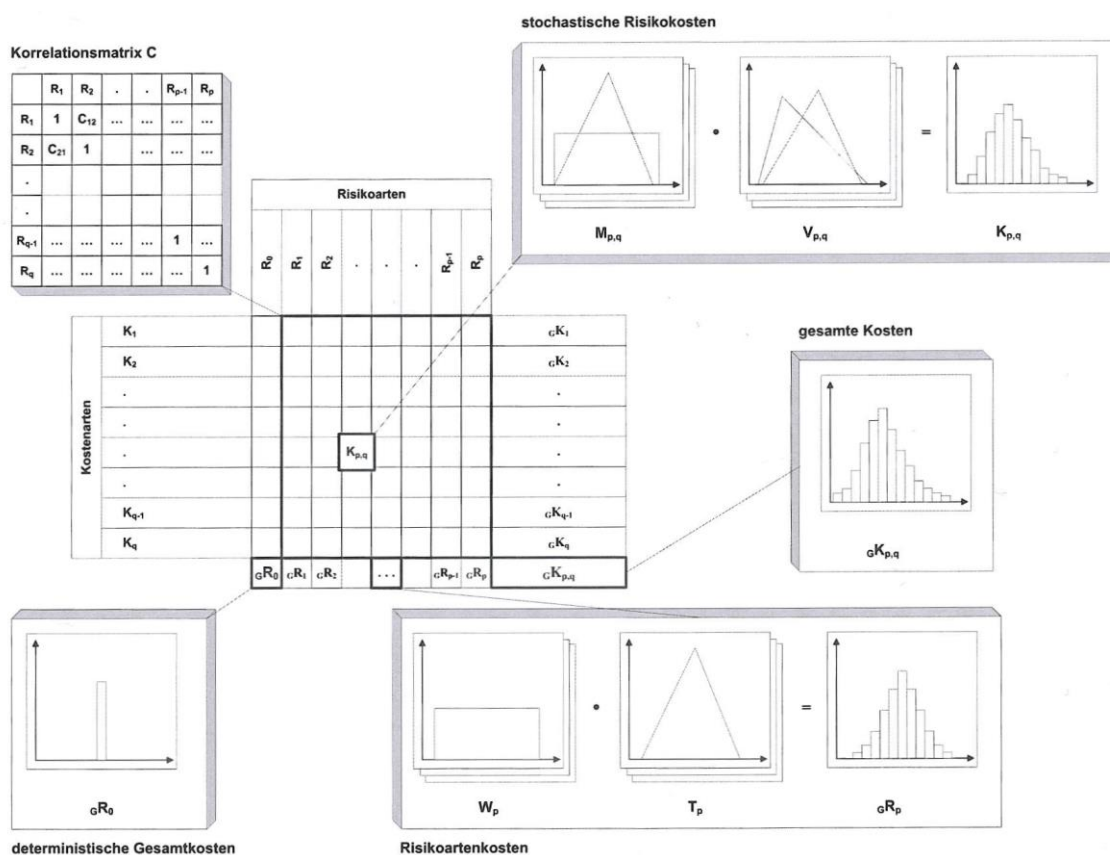


Abbildung 2.3: Kosten-Risiko-Matrix⁹⁸

⁹⁷ vgl. NAUMANN (2007)

⁹⁸ NAUMAN (2007), S. 265

Im Kosten-Risiko-Modell erfolgt eine Zuordnung von Kosten und Risiken aus den vorherigen Teilmodellen in einer Kosten-Risiko-Matrix (Abbildung 2.3). Dabei werden neben den deterministischen Gesamtkosten (ohne Risikoeinflüsse) die stochastischen Gesamtkosten in einer Risikoanalyse (Latin-Hyper-Cube Methode ⁹⁹) bestimmt.

In einer abschließenden Szenario-Analyse sind alle möglichen Risikoszenarien durch Kosten-Risiko-Zuordnung abzubilden und auszuwerten. Aus der Vielzahl an Ergebnisausprägungen sind abschließend, unter Zuhilfenahme der Risikomaße, die Entscheidungen vorzubereiten.

Die vorliegende Forschungsarbeit befasst sich eingehend mit den Besonderheiten der Verkehrsinfrastruktur und den damit verbundenen Investitionen. Dabei wird die Notwendigkeit einer Berücksichtigung von stochastischen Eingangsgrößen zur Investitionsrechnung und Entscheidungsfindung verdeutlicht. Das entwickelte Modell ist zu allgemein formuliert, um für alle Bestandteile der Verkehrsinfrastruktur Anwendung finden zu können. Eine spezielle Auseinandersetzung mit einzelnen Bauwerken (z. B. Straßentunneln) erfolgt nicht. Die angesprochenen „*durchgängigen Kostenstrukturen*“ konnten dadurch nicht aufgezeigt werden. Eine direkte Anwendung auf Straßentunnel mit dem Ziel einer Kostenoptimierung wird nicht angestrebt und ist aufgrund der Allgemeingültigkeit des Modells auch nicht möglich. Die im Modell untersuchten und entwickelten Ansätze, bspw. der Kostenstrukturen, der Berücksichtigung von Risiken usw., können allerdings als Ausgangsbasis für ein speziell auf Tunnelbauwerke ausgerichtetes Lebenszykluskostenmodell dienen.

2.2.4 Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken

Das Thema Nachhaltigkeit und die Bewertung von Tunnelbauwerken hinsichtlich deren Nachhaltigkeit werden in den letzten Jahren von Seiten der Wissenschaft verstärkt aufgegriffen. Dabei lassen sich zwei grundsätzlich verschiedene Herangehensweisen erkennen. Globale Betrachtungen von Trassierungsvarianten für Straßen und den zugehörigen Ingenieurbauwerken, wie bspw. Brücken oder Tunnel, bzw. gezielte Untersuchungen von singulären Tunnelbauwerken ohne Einbeziehung des vor- bzw. nachgelagerten Verkehrsweges.¹⁰⁰ Unabhängig vom Untersuchungsrahmen ist es das Ziel, die Nachhaltigkeitsaspekte auf die Bereiche des Tunnelbaus zu übertragen und diese so in den Entscheidungsprozess einzubinden. Neben den ökonomischen Kriterien werden je nach Zielstellung auch ökologische, soziokulturelle sowie technische Kriterien zur Bewertung und Entscheidungsfindung einbezogen.

2.2.4.1 SAUER UND FISCHER

SAUER und FISCHER¹⁰¹ stellen in verschiedenen Veröffentlichungen zur bauwerksübergreifenden Bewertung von Straßentrassen und den zugehörigen Ingenieurbauwerken ein Modell vor, das eine Entscheidungsfindung hinsichtlich von Nachhaltigkeitskriterien ermöglicht. Dabei werden bislang neben ökonomischen (Lebenszykluskosten und externe Kosten) auch ökologische Kriterien – in Form der monetär bewerteten CO₂ Emissionen – in die Bewertung einbezogen. Ziel des Forschungsvorhabens ist eine entsprechende Erweiterung des Betrachtungsrahmens, um weiterführende Kriterien in das Modell zu integrieren. Der Fokus richtet sich dabei nicht auf die vorrangige Optimierung einzelner Bau-

⁹⁹ Die Latin-Hyper-Cube Methode ist eine Spezifizierung der Monte-Carlo-Simulation (vgl. Abs. 3.3).

¹⁰⁰ vgl. ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 472 ff.

¹⁰¹ vgl. FISCHER, SAUER (2011); SAUER ET AL. (2012); SAUER, FISCHER (2013)

werke. Vielmehr wird das globale Ziel verfolgt, die gesamte Trassenführung zu optimieren. Detailliertere Betrachtungen des singulären Bauwerkes finden bislang nicht bzw. nur übergeordnet statt, so dass eine gezielte Optimierung einzelner Elemente von Tunnelbauwerken nicht umsetzbar ist.

2.2.4.2 KAMARIANAKIS

Das von KAMARIANAKIS¹⁰² entwickelte Modell dient als Entscheidungshilfe für die Wahl des Bauverfahrens für unterirdische Infrastrukturprojekte. Zur Steigerung der Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses wird ein mehrstufiges Modell vorgestellt, das eine nachhaltigkeitsorientierte Bewertung alternativer Lösungsvorschläge unter Einbeziehung des vollständigen Lebenszyklus ermöglicht (Abbildung 2.4). Hierfür werden neben ökonomischen auch ökologische, soziokulturelle und technische Kriterien in den Entscheidungsprozess einbezogen.

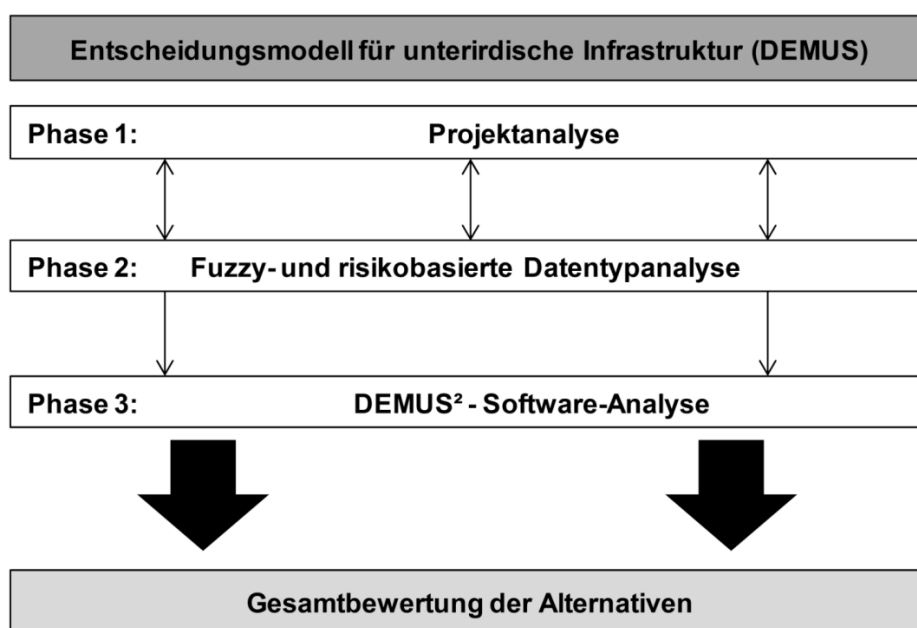


Abbildung 2.4: Aufbau des Entscheidungsmodells für unterirdische Infrastruktur¹⁰³

Aufgrund der Heterogenität der Kriteriengrößen wird für eine nachvollziehbare Bewertung auf den Analytisch-Hierarchischen Entscheidungsprozess (AHP) als multikriterielles Entscheidungssystem zurückgegriffen. Die Besonderheit hierbei ist die Berücksichtigung von scharfen, unscharfen sowie unsicheren Eingangsgrößen zur Entscheidungsfindung.

Die im Entscheidungsprozess auftretenden qualitativen Unschärfen (z. B. subjektive Bewertung in der Form „größer“, „lauter“, „wahrscheinlicher“) werden mit Hilfe der Fuzzy-Methode in quantitative Werte überführt und in den AHP integriert. Durch die Fuzzyifizierung wird eine Berücksichtigung aller bekannten Unschärfen (quantitativ oder auch qualitativ) im Entscheidungsmodell möglich. Die für die Bewertung mit quantitativen Unsicherheiten belegten Eingangsparameter werden im Vorfeld des Entscheidungsmodells mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation einbezogen (kumulative Kurven). Die scharfen, unscharfen und unsicheren Kriteriengrößen gilt es im Zuge einer Projektanalyse zu erarbeiten.

¹⁰² vgl. KAMARIANAKIS (2013); KAMARIANAKIS, ADDEN, THEWES (2013); THEWES, KAMARIANAKIS (2014)

¹⁰³ KAMARIANAKIS (2013), S. 117

Für eine ganzheitliche Bewertung wird entsprechend des Nachhaltigkeitsgedankens auf die Hauptkriterien Ökonomie, Ökologie, Technik und Soziales eine Grundhierarchie aufgebaut. Die für die Bewertung notwendige weiterführende Unterteilung der Kriterien hat projektspezifisch und in Zusammenarbeit der einzelnen Projektbeteiligten zu erfolgen.

Das vorgestellte Entscheidungsmodell ist auf die Auswahl eines geeigneten Bauverfahrens ausgerichtet. Die Anwendung beschränkt sich letztlich auf einen einzigen Zeitpunkt im Planungsprozess eines Tunnelbauwerkes. Aufgrund des übergeordneten Untersuchungsrahmens erfolgt keine dezidierte Auseinandersetzung mit den Lebenszykluskosten der einzelnen Alternativen. Diese sind bereits im Vorfeld, beispielsweise unter Zuhilfenahme des Modells von VOGT¹⁰⁴, projektspezifisch zu erfassen. Eine aktive ökonomische Optimierung des Bauwerkes, auch in späteren Lebensphasen (z. B. Nutzungsphase), wird aufgrund der Zielstellung nicht angestrebt.

2.2.4.3 ENGELHARDT, KEUSER UND SCHWARZ

ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ¹⁰⁵ stellen ein Nachhaltigkeitsmodell vor, dessen Zielstellung die Optimierung von Tunnelbauwerken hinsichtlich der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Nachhaltigkeitskriterien darstellt. Der Betrachtungsumfang beschränkt sich dabei auf das einzelne Bauwerk. Als Bewertungsgrößen dienen die direkten und indirekten Kosten des einzelnen Bauwerkes sowie sämtliche gesellschaftsrelevanten Nutzen. Für die Vergleichbarkeit von Kosten und Nutzen sind alle Werte in monetäre Größen zu überführen. Bei bislang nicht monetarisierbaren Nutzengrößen erfolgt eine Transformation mit Hilfe von Vergleichswerten auf Basis eines Analytisch-Hierarchischen Entscheidungsprozesses (AHP) in Anlehnung an LISSON¹⁰⁶. Zur Erfassung der direkten Lebenszykluskosten des Tunnelbauwerkes dient das Modulare Prozessmodell, das im Zuge der vorliegenden Forschungsarbeit entwickelt und in Abs. 6 eingehend erläutert wird. Mit dem vorgestellten Modell wird eine gezielte, aktive Optimierung sowohl der ökonomischen als auch aller weiteren Nachhaltigkeitskriterien angestrebt.

2.2.5 Lebenszykluskostenmodelle für Tunnelbauwerke

Das Thema Lebenszykluskosten war im Bauwesen bis vor wenigen Jahren fast ausschließlich auf den Bereich der Hochbau-Immobilien beschränkt. Ausschlaggebend war die bestehende Zielstellung einer wirtschaftlichen Projektumsetzung bzw. Vermarktung aus Sicht des Investors. Die Anforderungen des Nutzers (Miete, Lage, Gestaltung usw.) fließen dabei als wesentlicher Bestandteil der Lebenszyklusphilosophie in die verschiedenen Modelle mit ein. Beispielhafte Modelle wurden von ZAUNER, HERZOG, PELZETER, PFRÜNDNER oder RUDLOFF entwickelt.¹⁰⁷ Eine Übertragung auf Tunnelbauwerke ist durch die differierende Zielstellung nicht zielführend und wird deshalb auch nicht weiter verfolgt.

Im Bereich des Tunnelbaus existieren bislang sehr wenige wissenschaftliche Arbeiten mit der Zielstellung, die Lebenszykluskosten eines Bauwerkes zu erfassen und zu reduzieren. Die wesentlichen Modelle werden nachfolgend vorgestellt.

¹⁰⁴ vgl. VOGT (2012)

¹⁰⁵ vgl. ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013)

¹⁰⁶ vgl. LISSON (2014)

¹⁰⁷ vgl. ZAUNER (2003); HERZOG (2005); PELZETER (2006); PFRÜNDNER (2010); RUDLOFF (2010)

2.2.5.1 Optimierung von Straßentunnelprojekten

Erste Ansätze zur Erfassung und Optimierung der Gesamtkosten von Straßentunneln finden sich in der Forschungsarbeit von HASENAUER, STROHMEIER und MAK.¹⁰⁸ Ergebnis hieraus ist ein analytisch-simulatives Modell zur Bestimmung und Optimierung der Bau- und Betriebskosten von Straßentunneln. Das Gesamtmodell setzt sich dabei aus Teilmodellen zusammen:

- Auslegungsmodelle
 - Bauliche Errichtung
 - Lüfterauslegung
 - Beleuchtungsauslegung
 - Elektromechanische Ausrüstung
- Betriebsmodelle
 - Beleuchtung
 - Belüftung
 - Jährliche Personalkosten und sonstige Betriebskosten
- Investitions- und Finanzplanungsmodell

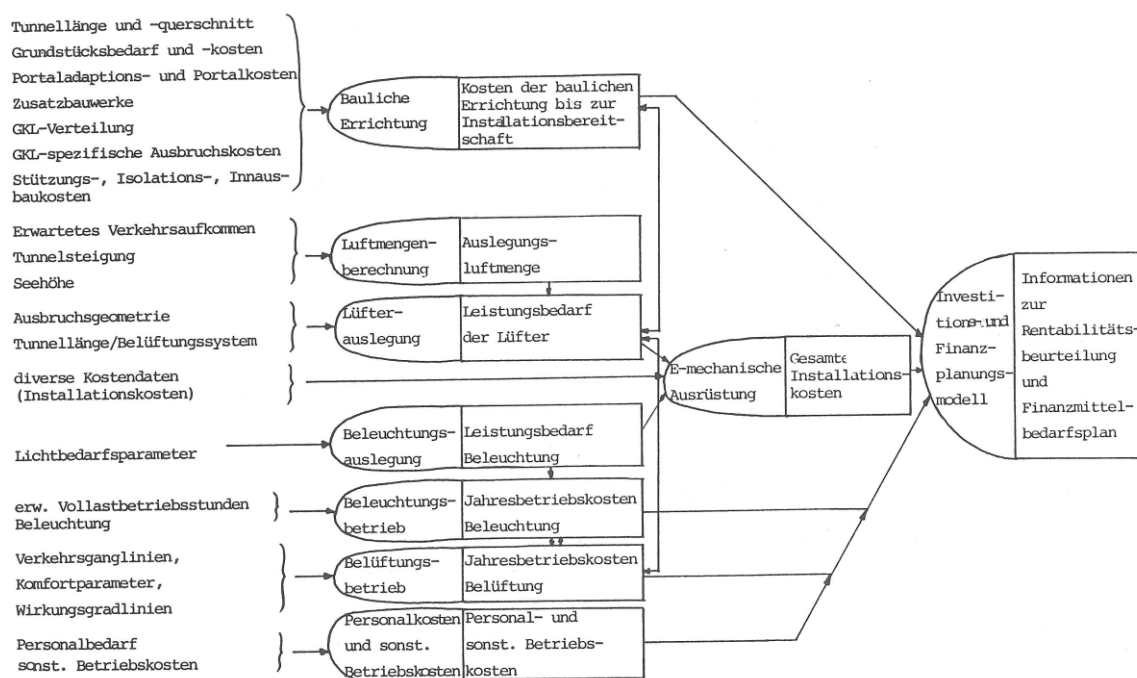


Abbildung 2.5: Darstellung der Modellzusammenhänge¹⁰⁹

Die Kosten werden in Abhängigkeit der vorliegenden Projektparameter mittels EDV-Programm für die einzelnen Teilmodelle numerisch bestimmt und zu den Gesamtkosten zusammengeführt. Das investitionsrechnerische Grundmodell basiert dabei auf der Kapitalwertmethode.

¹⁰⁸ vgl. HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983)

¹⁰⁹ HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983), S. 13

Zur Ermittlung der Baukosten wird das Bauwerk in vier Teilbereiche (Portale, Tunnelbauwerk, Nischen, Lüftungsbauwerke) untergliedert. Die Kosten sind für die einzelnen Kostengruppen extern zu ermitteln und in das Modell zu übertragen. Für Beleuchtung und Lüftung wird anhand der Projektparameter die jeweils erforderliche Anschlussleistung bestimmt und hieraus die jährlichen Betriebskosten abgeleitet.

Das vorgestellte Modell bietet erste Ansätze zur ökonomischen Optimierung von Tunnelbauwerken. In Bezug auf die hier verfolgte Zielstellung ist allerdings eine Übernahme von entwickelten Ansätzen nicht möglich. Beispielsweise ist eine eigenständige Bestimmung der Anschlussleistungen für Beleuchtung und Lüftung aufgrund fehlender Transparenz sowie moderner Simulationsprogramme und deren realitätsnaher Berechnungsmodelle nicht mehr zweckmäßig. Für die Entwicklung eines neuen Modells haben eine Erweiterung der zu berücksichtigenden Kosten (z. B. Instandhaltung, Inspektion, Reinigung Tunnelröhre) sowie eine Einbeziehung von Instandsetzungsmaßnahmen und Leistungen für den Bauteilaustausch zu erfolgen. Die steigenden Anforderungen an die Betriebs- und Sicherheitstechnik von Straßentunneln gilt es durch ein offenes System zu berücksichtigen. Mögliche Abhängigkeiten sind aufzubereiten, so dass Substitutionspotentiale bestimmt und Optimierungsansätze untersucht werden können.

2.2.5.2 Lebenszykluskosten von Einhausungen

Im Beitrag „Sicherheitsniveau und Lebenszykluskosten von Einhausungen bei Bundesfernstraßen“ werden Ergebnisse zweier unveröffentlichter Forschungsberichte zusammengefasst.¹¹⁰ Ziel der einzelnen Forschungsarbeiten war es, die gemäß RABT¹¹¹ erforderliche technische Ausstattung von Straßentunneln dem tatsächlichen Sicherheitsniveau von Einhausungen anzupassen und dadurch eine Kostenreduzierung zu erreichen.

Mit Hilfe von risikoanalytischen Untersuchungen erfolgte eine Bewertung des Sicherheitsniveaus verschiedener Kategorien von Einhausungen sowie Referenztunneln mit unterschiedlichen Ausstattungsgraden.

Zur Bestimmung der ökonomischen Folgen, die aus einer optimierten Gestaltung der Tunnelausstattung resultieren, wurden die Lebenszykluskosten der einzelnen Bauwerkstypen – in Abhängigkeit von der Tunnellänge – berechnet. Die Errichtungskosten (Bauwerk und Ausstattung) wurden aus bereits realisierten Projekten abgeleitet und Kostensätze für einzelne Gewerke ermittelt. Für die Bestimmung der laufenden Kosten wurde auf das Berechnungsmodell und die Grundwerte der ABBV¹¹² zurückgegriffen und hieraus die Erneuerungs- und Unterhaltskosten bestimmt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass trotz einer Reduzierung der technischen Ausstattung von Einhausungen das geforderte Sicherheitsniveau der RABT erfüllt werden kann. Gleichzeitig ist eine Reduzierung der Lebenszykluskosten zu verzeichnen. Durch den Rückgriff auf die ABBV zur Bestimmung der Gesamtkosten wird allerdings kein eigenständiges Lebenszykluskostenmodell vorgestellt. Wie bereits im Berechnungsmodell der ABBV unterbleibt eine Einbeziehung der Betriebskosten (Energie, Reinigung usw.), so dass die Kosten nicht vollständig abgebildet werden.¹¹³ Eine vollumfängliche Lebenszykluskostenrechnung findet letztlich nicht statt.

¹¹⁰ vgl. SISTENICH ET AL. (2012)

¹¹¹ vgl. FGSV (2006) – Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)

¹¹² vgl. BMVBS 2010B – Ablösungsbeiträge-Berechnungsvorschrift (ABBV) bzw. Abs. 2.1.1.4

¹¹³ vgl. BMVBS (2010)B, S. 10; bzw. siehe hierzu Erläuterungen ABBV bzw. Abs. 2.1.1.4

2.2.5.3 Tunnel-Management-System

In den Veröffentlichungen von HOLST¹¹⁴ wird ein Ansatz zur Optimierung der Aufwendungen für Betrieb und Unterhalt von Straßentunneln und der dabei anfallenden Kosten vorgestellt. Das hierfür entwickelte Tunnel-Management-System (TMS)¹¹⁵ basiert auf praktischen Erfahrungen aus dem Tunnelbetrieb. Es soll dazu beitragen, den Betrieb und die notwendigen Unterhaltsmaßnahmen zu strukturieren und die ökonomisch sinnvollste Strategie zu bestimmen. Als grundsätzliche Instandhaltungsstrategien stehen ein präventives oder ein korrekatives Vorgehen zu Wahl, wobei die jeweiligen Maßnahmen in drei Kategorien eingeteilt werden:

- Zurückführung in den ursprünglichen Zustand
- Instandsetzung zur Überbrückung bis zur nächsten Grundsanierung
- Verzicht auf Instandsetzung bis zum Verlust der Nutzersicherheit und anschließendem Neubau

Durch die Systematisierung und Bündelung verschiedener Unterhaltsmaßnahmen sollen Synergieeffekte generiert werden, die dazu beitragen, die entstehenden Kosten zu reduzieren. Gleichzeitig ist die Beeinträchtigung von Verkehr und Nutzersicherheit auf ein Minimum zu beschränken. Für eine Optimierung der Betriebs- und Unterhaltsmaßnahmen wird folgendes Vorgehen vorgeschlagen:

- Planung der erforderlichen präventiven Instandhaltungsmaßnahmen
- ökonomische Bewertung der Maßnahmen und Planungen
- Optimierung durch Systematisierung und Bündelung der Maßnahmen
- Rückkopplung durch Beobachtung der ausgeführten Maßnahmen

Die zur Planung des Betriebs und Unterhalts notwendigen Informationen, insbesondere für größere Instandhaltungsmaßnahmen, sind bei Bauwerksprüfungen, Besichtigungen und laufenden Beobachtungen zu sammeln, aufzubereiten und zu dokumentieren. Aus den gewonnenen Daten werden die notwendigen Maßnahmen und die dabei anfallenden Kosten abgeleitet.

Die Anwendung einer Lebenszykluskostenrechnung zur ökonomischen Bewertung der Maßnahmen ist die Ausgangsbasis zur Bestimmung der idealen Betriebs- und Instandhaltungsstrategie sowie zur Budgetplanung. Die Lebenszykluskostenkalkulation erfolgt unter Verwendung der Kapitalwertmethode. Die jährlichen Kosten aus Betrieb und Unterhalt bestimmen sich anteilig aus den Bauwerkskosten. Hierfür werden Erfahrungswerte ausgewiesen, die vom Bauwerksalter abhängig sind (Tabelle 2.5).

Tabelle 2.5: Betriebs- und Unterhaltskosten in Abhängigkeit vom Bauwerksalter¹¹⁶

Bauwerksalter	Betriebs- und Unterhaltskosten
0 bis 10 – 15 Jahre	0,8 – 1,0% der Herstellkosten
10 – 15 bis 25 – 30 Jahre	ansteigend von 1,0 – 1,5 % bis zu 2,0 % der Herstellkosten
über 25 – 30 Jahre	2,0 % der Herstellkosten

¹¹⁴ vgl. HOLST (2012)A; HOLST (2012)B

¹¹⁵ Die Systematik ist vergleichbar mit dem deutschen Bauwerks-Management-System (BMS). vgl. HAARDT (2002)

¹¹⁶ HOLST (2012)B, S. 7

Zusätzlich zu den Betriebs- und Unterhaltskosten sind ab dem 25. Betriebsjahr Kosten für den Austausch bzw. die Erneuerung der Tunnelausstattung zu berücksichtigen. Der technologischen Entwicklung besonders unterworfenen Bauteile wie Computer, USV-Anlagen, Software usw. sind frühzeitiger für einen Austausch einzuplanen.

HOLST schlussfolgert aus den bisherigen Erfahrungen, dass zu geringe Instandhaltungsaufwendungen nicht ausreichend sind, um nachhaltig das Bauwerk zu erhalten. Stattdessen hat für einen ökonomischen Betrieb eine präventive Instandhaltung zu erfolgen, die eine dauerhafte Zustandserfassung erfordert.

Die Veröffentlichungen zeigen auf, wie die Erfahrungen aus in Betrieb befindlichen Bauwerken zielgerichtet genutzt werden können. Ein vergleichbares Vorgehen ist in Deutschland mit DIN 1076 sowie RI-EBW-PRÜF und BMS ebenfalls bereits implementiert.¹¹⁷ Durch eine gezielte Erfassung von Daten und deren Berücksichtigung, sowohl für den Neubau als auch für den Betrieb von Straßentunneln, lassen sich Optimierungspotentiale generieren und umsetzen. Die sehr pauschalen Werte für die Betriebs- und Unterhaltskosten ermöglichen jedoch eine gezielte Optimierung der Instandhaltungsstrategien nur auf übergeordneter Ebene. Bis zu welchem Grad eine tiefergehende Erfassung und Berücksichtigung der Kosten im Lebenszykluskostenmodell erfolgt, ist den Veröffentlichungen nicht zu entnehmen. Für eine Vergleichbarkeit der Daten und deren Übertragung auf andere Bauwerke hat eine detailliertere Strukturierung und Erfassung mit Hilfe einer konsistenten Kostenstruktur zu erfolgen. Vorhandene Abhängigkeiten würden sich daraus ableiten lassen. Für eine aktive Optimierung wäre die Vorgehensweise zu erweitern.

2.2.5.4 Reduction of Operational Cost of Road Tunnels

Die „World Road Association“ (PIARC)¹¹⁸ beschäftigt sich in den letzten Jahren verstärkt mit dem Thema Straßentunnel und einer gezielten Reduzierung der Betriebskosten. Seit 1999 wurden insgesamt fünf Berichte zum Thema Tunnelausstattung und Betrieb veröffentlicht. Für die vorliegende Arbeit wesentlich sind die Berichte „Reduction of Operational Cost of Road Tunnels“ und „Life Cycle Aspects of electrical Road Tunnel Equipment“. Die weiteren Beiträge behandeln im Wesentlichen die Leistungen für den Betrieb und Unterhalt von Straßentunneln.¹¹⁹ Eine Applikation hinsichtlich einer Lebenszykluskostenrechnung erfolgt dabei nicht.

Mit dem Report „Reduction of Operational Cost of Road Tunnels“ wird eine Optimierung der Betriebskosten von Straßentunneln angestrebt.¹²⁰ Dazu erfolgt eine Auswertung realer Betriebskosten von Tunnelbauwerken unterschiedlicher Nationen und Konfigurationen als Fortschreibung bestehender Analysen. Die Kosten werden dabei in die Kostenarten

- Energiekosten,
- Personal- und Managementkosten sowie
- Unterhaltskosten

unterteilt.

¹¹⁷ vgl. DIN 1076 (1999); BMVBS (2007); HAARDT (2002); HOLST (2005)

¹¹⁸ Die PIARC (als Welt-Straßenverband) ist ein Zusammenschluss von über 120 Nationen, mit dem Ziel, den Austausch über und die Entwicklung für den Straßenbetrieb länderübergreifend zu fördern.
vgl. <http://www.piarc.org/ressources/documents/11655,Presentation-World-Road-Association-PIARC.pdf>, abgerufen am 24.06.2014

¹¹⁹ vgl. PIARC (2005); PIARC (2008); PIARC (2012)A

¹²⁰ vgl. PIARC (1999)

Zusätzlich erfolgt eine Untersuchung einzelner Parameter, z. B. der Tunnellänge, hinsichtlich des Einflusses auf die Betriebskosten. Die Ergebnisse werden als qualitative Größen (hoch, niedrig) ausgewiesen.

Die Energiekosten werden hinsichtlich der Ausstattungselemente Beleuchtung, Lüftung und Gebäudeausrüstung (Betriebsgebäude) sowie der Energiepreise untersucht. Personal- und Managementkosten sind nationenweit unterschiedlich, so dass eine globale Untersuchung und Bewertung nicht erfolgt. Für die Unterhaltskosten erfolgt ebenfalls eine Differenzierung für die oben aufgeführten Ausstattungselemente sowie eine Bewertung von Einsparpotentialen. Die Wirtschaftlichkeit von Unterhaltsmaßnahmen ist durch Untersuchung unterschiedlichen Strategien (präventiv, korrektiv usw.) nachzuweisen. Zur Auffindung von Verbesserungspotentialen wird die Durchführung von Benchmarking angeraten und der notwendige Umfang erläutert. Die abschließenden Empfehlungen sollen dazu beitragen, die Betriebs- und Unterhaltskosten von Tunnelbauwerken zu reduzieren.

Mit dem Bericht wurden erstmals Kostenkennwerte veröffentlicht, die eine detaillierte Einschätzung über die wesentlichen Betriebskosten ermöglichen. Die vorgestellten Ansätze sollen dazu beitragen, die Betriebskosten zu reduzieren, ohne das Niveau der Tunnelsicherheit negativ zu beeinflussen. Ein ganzheitliches Lebenszykluskostenmodell ist dabei nicht implementiert. Vielmehr beschränken sich die Ergebnisse auf ausgewählte Elemente der Tunnelausstattung und Einflussgrößen sowie verbal argumentativen Ansätzen zur Kostenreduzierung. Erstmals erfolgt dabei eine Einbeziehung von Einflussparametern für eine aktive Optimierung der Lebenszykluskosten.

Die dem Report zugrundeliegenden Daten sind der Veröffentlichung nicht vollumfänglich beigefügt, so dass die Untersuchungsschritte und die daraus resultierenden Ergebnisse nicht nachvollziehbar sind. Vor einer Anwendung der ermittelten Kostenkennwerte in einem Lebenszykluskostenmodell sind aufgrund der fehlenden Transparenz (Eingangsgrößen, Parameter, Randbedingungen usw.) weitere Untersuchungen vorzunehmen. Auch vor dem Hintergrund, dass eine Zusammenführung von Werten über Landesgrenzen hinweg erst dann möglich wird, wenn die unterschiedlichen Anforderungen an die Sicherheit, abweichende Baustandards, Löhne usw., in der Auswertung Berücksichtigung finden.

2.2.5.5 Life Cycle Aspects of electrical Road Tunnel Equipment

In der durch die PIARC veröffentlichten Studie „Life-Cycle Aspects of electrical Road Tunnel Equipment“ wird der Einfluss der Lebensdauer elektronischer Tunnelausstattung auf die Lebenszykluskosten untersucht.¹²¹ Ziel ist es, durch Berücksichtigung der Lebenszyklusaspekte, die Planung und den späteren Unterhalt der Tunnelausstattung hinsichtlich einer Kostenreduzierung zu unterstützen.

Dazu werden die theoretischen Grundlagen einer wahrscheinlichkeitsbasierenden Bestimmung der Lebensdauer erörtert und die für die Betrachtung wesentlichen Begriffe, beispielsweise MTTF, MTBF oder MTTR¹²², näher bestimmt. Zusätzlich wird der Einfluss von Umweltfaktoren (z. B. Temperatur) für den Alterungsprozess aufgezeigt.¹²³

¹²¹ vgl. PIARC (2012)^B

¹²² Mean Time To Failure (MTTF) – Mittelwert der Betriebsdauer bis zum Ausfall;
Mean Time Between Failure (MTBF) – Mittelwert der Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen;
Mean Time To Repair (MTTR) – Mittelwert der Reparaturdauer;
vgl. BERTSCHE, LECHNER (2004), S. 31 bzw. S. 354

¹²³ Zur Abbildung der Temperaturabhängigkeit wäre beispielsweise die Arrhenius-Gleichung in die Bestimmung der Lebensdauer für die einzelnen Bauteile einzubinden.

Ausgehend von einer Datenerhebung unter 27 Befragten wurden die durchschnittlichen Lebensdauern verschiedener Ausstattungselemente, z. B. Beleuchtung oder Lüftung, durch statistische Auswertungen bestimmt. Darauf aufbauende Empfehlungen zur Festlegung des Austauschzeitpunktes sollen helfen, die Kosten für die Tunnelausstattung zu reduzieren. Hierzu wurde die Strategie zum Bauteilaustausch (präventiv oder korrektiv) und die daraus resultierenden finanziellen Auswirkungen beispielhaft dargestellt.

Das Ergebnis der Studie zeigt, dass eine realitätsnahe Abschätzung der Lebensdauern für die Tunnelausstattung mit Hilfe statistischer Auswertungen von tatsächlichen Ausfallzeitpunkten zur Steigerung der Prognosequalität beiträgt. Die Kosten für die Tunnelausstattung lassen sich dadurch gezielt optimieren. Wie in der Studie angesprochen, ist es dabei wichtig, die Gründe, die zum Bauteilausfall führten, in der Auswertung zu berücksichtigen. Eine Übertragung auf andere Bauwerke, wo abweichende Randbedingungen vorliegen, wäre andernfalls fehlerhaft und würde das Ergebnis verfälschen. Zur besseren Einschätzung liefert die Studie Hinweise über die wesentlichen Einflussfaktoren. Inwieweit dies in den durch die Umfrage ermittelten durchschnittlichen Lebensdauern der Tunnelausstattung berücksichtigt wurde, ist nicht festgehalten. Es werden weder Aussagen zu den verwendeten Materialien, den vorliegenden Randbedingungen, dem Einbaujahr oder dem Grund des Ausfalls noch eine Relation zu den einzelnen Nationen und deren unterschiedlichen Anforderungen dargestellt. Vor einer Anwendung der veröffentlichten Werte ist deshalb eine Verifizierung anzuraten.

2.2.5.6 Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln

Zur Umsetzung nachhaltiger Investitionen im Bereich von Straßentunneln hat VOGT¹²⁴ ein Entscheidungsmodell auf Basis des Lebenszykluskonzeptes entwickelt. Hierfür wurde die bisherige Lebenszyklus-Philosophie aus dem Bereich der Immobilienwirtschaft auf die Rahmenbedingungen von Tunnelbauwerken adaptiert. Für diesen Schritt erfolgt eine Identifizierung der baulichen und betrieblichen Besonderheiten von Straßentunneln sowie der inneren und äußeren Randbedingungen für die Planung (Errichtung oder Sanierung). Wesentliches Ziel ist das Aufzeigen der ökonomischen Folgen, die aus der Umsetzung eines Tunnelbauwerkes respektive der einzelnen Bestandteile resultieren. Eine Unterteilung des Bauwerkes in einzelne, abgegrenzte Module erlaubt hierfür eine strukturierte Erfassung der für die Lebenszykluskostenrechnung notwendigen Daten.

Zur Bestimmung der Lebenszykluskosten wird eine Zeit-Kosten-Matrix aufgestellt, die die Kosten der einzelnen Module zeitlich strukturiert. Die Kosten selbst werden in Initial- und Folgekosten differenziert. Die Initialkosten sind extern zu erheben. Die Bestimmung der Folgekosten basiert, ausgehend von den Initialkosten, auf Kostenfaktoren (wertorientiertes Verfahren). Das Ergebnis ist eine verursachungsgerechte Zuweisung von Erst- und Folgekosten für jedes Bauteil bzw. jede Komponente. Die Folgekosten setzen sich dabei aus den Betriebs- und Funktionserhaltungskosten sowie den Kosten für den Bauteilaustausch zusammen (Abbildung 2.6).

Ausgehend von der Zeit-Kosten-Matrix wird mit Hilfe der Kapitalwertmethode eine Vergleichbarkeit der zeitlich unterschiedlichen Kosten ermöglicht. Dazu werden die Kosten in eine Ergebnismatrix überführt und durch Zinseszinsrechnung kapitalisiert. Abschließend wird der Kapitalwert, als Vergleichsbasis der untersuchten Varianten, aus der Summe der kapitalisierten Einzelwerte gebildet.

¹²⁴ vgl. VOGT (2012)

Unsicherheiten, die u. a. aufgrund des großen Betrachtungszeitraumes auftreten können, sind im Modell dadurch berücksichtigt, dass die Initialkosten mit einem veränderlichen Faktor versehen werden. Hierüber lassen sich sowohl positive als auch negative Schwankungen abbilden. Durch die Ableitung der Folgekosten aus den Initialkosten werden die möglichen Schwankungsbreiten entsprechend übernommen. Als weitere Unsicherheiten hat VOGT die Preisentwicklungen für Energie und Instandhaltung sowie die Zinsentwicklung zur Bestimmung des Kapitalzinssatzes identifiziert. Diese lassen sich durch Preissteigerungsfaktoren bei der Bestimmung der Kosten für die Ergebnismatrix bzw. variierende Kapitalzinssätze für die Kapitalwertmethode berücksichtigen.

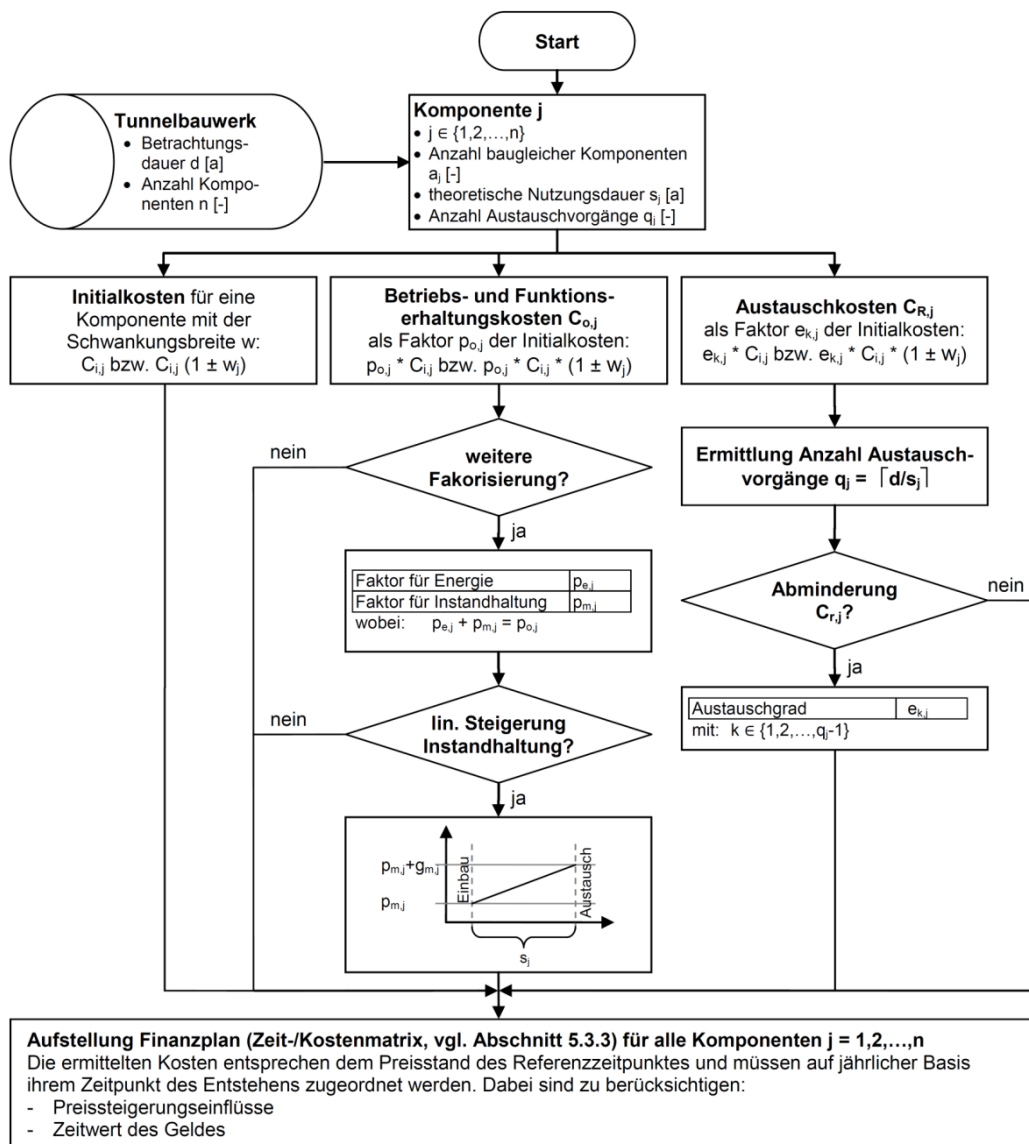


Abbildung 2.6: Ablaufschema zur Bestimmung der Kosten für die Zeit-Kosten-Matrix¹²⁵

Auf Basis der entwickelten Vorgehensweise wurde ein Excel-Tool programmiert, das zwei Szenarien der Lebenszykluskostenrechnung unterscheidet. Die Untersuchung und Bewertung von neu zu errichtenden Tunnelbauwerken mit PTLCC (Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs) und die Abbildung und Planung von in Betrieb befindlichen Bauwerken mit OTLCC (Operational Tunnel Life-Cycle Costs).

¹²⁵ VOGT (2012), S. 135

Zusätzlich zum Lebenszykluskostenmodell erfolgt eine dezidierte Auseinandersetzung mit der Nutzungsdauer der elektromechanischen Tunnelausrüstung (z. B. Tunnellüfter). Das Ziel ist eine bessere Prognostizierbarkeit der Ausfallzeitpunkte einzelner Ausrüstungselemente sowie der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen. Dazu wurde das Ausfallverhalten entsprechender Bauteile eingehend untersucht und die Weibull-Verteilung als geeignete Verteilungsfunktion zur Beschreibung des Ausfallverhaltens identifiziert. Zur Ableitung des Austauschzeitpunktes wurde ein rechnerisches Näherungsverfahren entwickelt. Mit dessen Hilfe ist eine rechnerische Bestimmung der Verteilungsfunktion – ausgehend von beobachteten Ausfallzeitpunkten – möglich. Mit Anwendung der statistischen Auswertungen werden abschließend deterministische Eingangsgrößen für das Lebenszykluskostenmodell bestimmt.

Mit dem vorgestellten Lebenszykluskostenmodell ist eine strukturierte Erfassung der Kosten der einzelnen Module möglich. Die gewählte Modularisierung erlaubt eine auf die Zielstellung und Informationsdichte angepasste Bestimmung der Lebenszykluskosten. Die Bestimmung und Abgrenzung der Module erfolgt allerdings ohne vorgegebene Kriterien, was einen Vergleich bzw. einen Übertrag auf andere Bauwerke erschwert. Für eine aktive Optimierung wäre das Modell entsprechend zu erweitern bzw. anzupassen. Zusätzlich hat zur Generierung von Substitutionspotentialen eine Einbeziehung der Abhängigkeiten und Einflussparameter zu erfolgen.

Durch die Anwendung des Korrekturverfahrens zur Berücksichtigung von Unsicherheiten werden diese nur summarisch und nicht nach deren jeweiliger Eintrittswahrscheinlichkeit erfasst.¹²⁶ Mit Hilfe wahrscheinlichkeitsbasierter Simulationsverfahren (z. B. Monte-Carlo-Simulation) wäre an dieser Stelle eine Steigerung der Prognosegenauigkeit zu erzielen.

Das Näherungsverfahren zur Bestimmung der Verteilungsfunktion für die Ausfallzeitpunkte der Tunnelausrüstung ist aus mathematischer Sicht zu prüfen und dann in ein wahrscheinlichkeitsbasierendes Modell zu integrieren. Allerdings gilt es zur Bestimmung der Ausfallzeitpunkte, die jeweiligen Gründe und die vorherrschenden Randbedingungen unbedingt zu berücksichtigen, damit eine Vergleichbarkeit der Werte gewährleistet werden kann.

Weitere Ansätze zur Berücksichtigung der Lebenszyklusphilosophie finden sich u. a. in den Veröffentlichungen von ROSTAM und HØJ¹²⁷, CHUNG ET AL.¹²⁸, PARKER und REILLY¹²⁹, THEWES und BIELECKI¹³⁰, HOFFMANN¹³¹, THEWES ET AL.¹³², auf die an dieser Stelle verwiesen wird. Werden entsprechende Ansätze in dieser Arbeit aufgegriffen, so erfolgt eine vertiefte Auseinandersetzung in den jeweiligen Abschnitten.

¹²⁶ siehe Erläuterungen zum Korrekturverfahren (Abs. 3.2.2.1)

¹²⁷ ROSTAM, HØJ (2004)

¹²⁸ CHUNG ET AL. (2006)

¹²⁹ REILLY, PARKER (2007); PARKER, REILLY (2009)

¹³⁰ THEWES, BIELECKI (2009)

¹³¹ HOFFMANN (2011)

¹³² THEWES ET AL. (2013)B

2.2.6 Bewertung der bisherigen Forschungsansätze

Die bisherigen Forschungsarbeiten und wissenschaftlichen Veröffentlichungen decken ein breites Spektrum zur ökonomischen Betrachtung von Tunnelbauwerken ab (Tabelle 2.6). Allerdings erst die Arbeiten von HASENAUER ET AL., HOLST, PIARC und VOGT verfolgen das Ziel, die Gesamtkosten eines Tunnelbauwerkes zu reduzieren.¹³³ Eine gezielte ganzheitliche Optimierung ist aber mit keinem Verfahren umsetzbar bzw. auch nicht angestrebt. Die hierzu notwendige detaillierte und strukturierte Erfassung der Kosten in einer konsistenten Kostenstruktur, die auch eine Vergleichbarkeit mit anderen Bauwerken ermöglicht, ist lediglich ansatzweise in einzelnen Forschungsarbeiten implementiert. Dazu gehört auch die Anpassungsfähigkeit des jeweiligen Modells an die vorliegende Planungs- und Informationsdichte.

Wie NAUMANN, VOGT oder auch KAMARIANAKIS zeigen, ist eine Berücksichtigung von Unsicherheiten in den Eingangsgrößen zur Steigerung der Prognosequalität unerlässlich.¹³⁴ Dazu genügt es allerdings nicht, die Unsicherheiten in ihrer maximalen Ausprägung aufzusummieren. Vielmehr sollte durch Berücksichtigung von Eintrittswahrscheinlichkeiten in der Lebenszykluskostenrechnung eine gezielte Aussage über die Ausprägungen der Zielgrößen möglich sein. Der Entscheidungsprozess würde dadurch an Transparenz gewinnen.

Tabelle 2.6: Bewertung der ökonomischen Betrachtungen in der Forschung

Kriterium		Ganzheitlichkeit			Transparenz Nachvollziehbarkeit	Detaillierung	Anpassungsfähigkeit	konsistente Strukturen	Optimierungsmöglichkeit	Prognoseunsicherheiten
		Bauwerk	Phasen	Kosten						
Modell	Verfahren Veröffentlichung									
Forschung	Steiger (2009)	o	-	-	++	++	+	o	--	++
	Dickenbrock (2012)	o	++	+	o	-	-	o	--	--
	Naumann (2007)	o	++	+	+	+	++	o	--	++
	Sauer / Fischer (2011 - 2013)	+	++	o	+	--	--	-	--	--
	Kamarianakis (2013)	++	++	o	+	+	+	-	--	++
	Hasenauer et al. (1983)	++	+	+	+	++	+	+	+	--
	Sistenich et al. (2012)	++	+	o	-	o	o	-	o	--
	Holst (2012)	+	o	o	o	o	-	o	+	--
	PIARC (1999)	+	o	+	o	+	o	-	+	--
	PIARC (2012)B	+	+	o	o	+	-	--	+	+
	Vogt (2012)	++	++	+	+	+	o	o	o	+

Legende: ++ Kriterium vollumfänglich erfüllt
 + Kriterium gut erfüllt
 o Kriterium durchschnittlich erfüllt / nicht anwendbar
 - Kriterium nur bedingt erfüllt
 -- Kriterium nicht erfüllt

¹³³ vgl. HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983); PIARC (1999); VOGT (2012)

¹³⁴ vgl. NAUMAN (2007); VOGT (2012); KAMARIANAKIS (2013)

2.3 Erforderlicher Umfang ökonomischer Betrachtungen zur ganzheitlichen Kostenoptimierung

Für eine ganzheitliche ökonomische Betrachtungsweise von Straßentunneln ist eine Einbeziehung von Erst- und Folgekosten auf Basis einer Lebenszykluskostenrechnung erforderlich. In den Richtlinien für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes (RBBau) ist eine entsprechende Forderung bereits formuliert:

„Bei der Untersuchung der Varianten sind die Grundsätze einer lebenszyklusorientierten Optimierung der Kosten zu berücksichtigen, insbesondere die späteren Betriebs- und sonstigen Nutzungskosten sowie die Risikokosten (...).“¹³⁵

Wie die Auseinandersetzung mit bisherigen Vorgehensweisen der Praxis gezeigt hat, erfolgt eine konsequente Umsetzung des Grundgedankens einer phasenübergreifenden Optimierung der Gesamtkosten – speziell für Tunnelbauwerke – bislang noch nicht bzw. nur für begrenzte Fragestellungen.¹³⁶ Besonders die Kostenplanung beschränkt sich im Wesentlichen auf die Herstellkosten. Die Folgekosten, als weiterführendes Qualitätskriterium, werden nur sehr untergeordnet für eine Kostenoptimierung in die Kostenplanung einbezogen.

Von Seiten der Wissenschaft wurde diese Unzulänglichkeit erkannt und unterschiedliche Modelle bzw. Vorgehensweisen zur lebensphasenübergreifenden Bestimmung der Gesamtkosten von Tunnelbauwerken vorgestellt. Dabei werden unterschiedliche Zielstellungen verfolgt: Ein Fokus richtet sich auf die Optimierung der Kosten, abgegrenzt auf einen beschränkten Untersuchungsrahmen wie singuläre Lebensphasen, Bauteile, Instandhaltungsstrategien usw. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der vollständigen Bestimmung der Lebenszykluskosten, ohne dabei eine aktive Optimierung anzustreben. Ein Modell, das die Kosten eines Tunnelbauwerkes vollständig erfasst und gleichzeitig eine ganzheitliche ökonomische Optimierung anstrebt, ist bislang weder wissenschaftlich begründet noch in der Praxis anzutreffen.

Wie ist eine ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken ganzheitlich umsetzbar?

Ein ganzheitliches Lebenszykluskostenmodell mit der Option zur aktiven Optimierung der Gesamtkosten ist deshalb Zielstellung der vorliegenden Arbeit. Dabei hat neben der originären Lebenszykluskostenbestimmung auch ein Aufzeigen von Substitutionspotentialen und den sich daraus ergebenden Optimierungsansätzen zu erfolgen. Wie die bisherigen Untersuchungen zeigen, liegen konsistente Strukturen zur transparenten Erfassung lediglich für die Herstellkosten vor. Für die Folgekosten fehlen bislang vergleichbare Strukturen, die auch eine Anpassungsfähigkeit an den Planungs- und Informationsstand gewährleisten können.

Ist ein hierarchisch strukturiertes Lebenszykluskostenmodell zur ganzheitlichen Erfassung und Optimierung der Gesamtkosten von Tunnelbauwerken geeignet?

¹³⁵ BMVBS (2013)B, S. E3/8

¹³⁶ siehe hierzu Abs. 2.1 oder auch KOHLBECKER (2010), S. 97

Um die Wirksamkeit von Optimierungsmaßnahmen und deren Umsetzbarkeit (auch im Hinblick auf die gegenseitige Beeinflussung) beurteilen zu können, ist eine Methodik zu entwickeln, die eine ganzheitliche Optimierung der Kosten eines Tunnelbauwerkes ermöglicht. Dazu muss der Zusammenhang zwischen den zu treffenden Entscheidungen und deren ökonomischen Auswirkungen eindeutig hergestellt werden. Nur so ist eine gezielte aktive Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken zu erreichen.

Wie können Substitutions- und Optimierungspotentiale gezielt aus einem Lebenszykluskostenmodell erarbeitet werden?

Die Verwendung der Lebenszykluskostenrechnung ist, bedingt durch die notwendigen Kostenprognosen, mit Unsicherheiten verbunden. Für eine transparente und nachvollziehbare Erfassung der Lebenszykluskosten ist es notwendig, diese Unsicherheiten zu erfassen und in den Entscheidungsprozess einzubeziehen.

In welcher Form können Unsicherheiten aus der Kostenprognose Berücksichtigung in der Lebenszykluskostenrechnung finden?

Zur Beantwortung der Fragestellungen werden an das zu entwickelnde Lebenszykluskostenmodell und die damit in Verbindung stehende Methodik zur Optimierung der Kosten folgende wesentliche Anforderungen gestellt:

▪ Ganzheitlichkeit

Für eine ganzheitliche Betrachtung hat das Modell das Bauwerk und dessen Lebenszyklus vollumfänglich mit allen Lebensphasen abzubilden. Die dabei anfallenden Prozesse und die hieraus resultierenden Kosten sind zu erfassen sowie nachvollziehbar und transparent darzustellen. Wesentliche Einflussparameter gilt es dabei zu identifizieren.

▪ Nachvollziehbarkeit und Transparenz

Eine modellgerechte Darstellung des Bauwerkes mit Blick auf Zielstellung und Anpassungsfähigkeit zur Optimierung soll eine Nachvollziehbarkeit und Transparenz der Methodik gewährleisten. Dies gilt sowohl für eine originäre Lebenszykluskostenrechnung als auch für die Bestimmung von Substitutionspotentialen bzw. Optimierungsmaßnahmen. Dazu gehören eine verursachergerechte und prozessbezogene Zuweisung der jeweiligen Aufwendungen und eine Zuordnung der wesentlichen Prozesse zu den einzelnen Lebensphasen. Durch Trennung von Gütern bzw. Dienstleistungen und den entsprechenden spezifischen Kosten ist eine Steigerung der Transparenz anzustreben.¹³⁷

Das Modell soll zur Bestimmung der wesentlichen Kostengrößen beitragen und im ersten Schritt das Verständnis über die Kostenverteilung ermöglichen. Im weiteren Schritt soll das Modell einen Anstoß für die Generierung von Optimierungsansätzen liefern.

¹³⁷ vgl. RIEGEL (2004), S. 71

▪ Detaillierung und Anpassungsfähigkeit

Die Komplexität von Tunnelbauwerken als Gesamtsystem erfordert eine hierarchische Strukturierung zur Erhöhung von Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Mit absteigender Hierarchie-Ebene hat eine zunehmende Detaillierung zu erfolgen. Dabei soll, je nach Planungs- und Informationsstand, eine Detaillierung des Modells – auch nur in Teilbereichen – erfolgen können, ohne die Anwendbarkeit des Gesamtmodells in Frage zu stellen.

Das Modell soll offen für Anpassungen hinsichtlich des Untersuchungsrahmens und der verfolgten Zielstellung sein. Hierfür ist eine Zerlegung des Tunnelbauwerkes in weitgehend unabhängige Einheiten (in Form von Modulen) anzustreben, mit dem Ziel eine beliebige Zusammenstellung möglicher Tunnelkonfigurationen oder die Austauschbarkeit alternativer Lösungsansätze umzusetzen.

▪ Generierung von Substitutionspotentialen und Optimierungsmöglichkeiten

Neben einer originären Lebenszykluskostenbestimmung ist eine aktive Optimierung der Gesamtkosten anzustreben. Dabei sind Substitutionspotentiale und Optimierungsansätze, auf Basis des zu entwickelnden Modells und der Methodik, in Kenntnis der Einflussfaktoren und Wechselwirkungen zu generieren. Hierfür sind diese Parameter in das Modell zu integrieren. Durch die Berücksichtigung von modulübergreifenden Interdependenzen soll zudem eine losgelöste Bewertung und Optimierung einzelner Module bzw. Prozesse ermöglicht werden.

▪ Berücksichtigung von Prognoseunsicherheiten

Die Lebenszykluskostenrechnung beruht auf Daten, deren Größe und Eintreten über den jeweiligen Betrachtungszeitraum prognostiziert werden. Die damit in Verbindung stehenden Unsicherheiten gilt es in die Entscheidungsfindung einzubinden. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen sind dabei wesentliche Einflussfaktoren für die Lebenszykluskosten zu identifizieren, so dass entsprechende Daten einer sorgfältigen Verifizierung über Größe und Eintreten unterzogen werden können.

Zusätzlich soll das Modell, zusammen mit unsicheren Attributen, durch Anwendung einer Risikoanalyse, eine wahrscheinlichkeitsbasierende Bestimmung der Lebenszykluskosten ermöglichen. Durch Einbindung eines geeigneten Analyseverfahrens ist – auf Basis des deterministischen Lebenszykluskostenmodells – eine einfache und anwenderfreundliche Umsetzung anzustreben.

▪ Konsistente Kostenstruktur

Als Grundlage für die Vergleichbarkeit von Planungsalternativen bzw. zur Gegenüberstellung mit anderen Projekten hat eine Erfassung der Kosten in einer konsistenten Kostenstruktur zu erfolgen. Die Kostenstruktur hat dabei die geforderte hierarchische Modellstruktur abzubilden. Eine Kostenfortschreibung entsprechend dem Planungs- und Wissensstand – auch während der Nutzungsphase – soll dadurch gewährleistet werden. Die Anwendbarkeit soll letztlich den gesamten Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes umfassen.

Eine konsistente Kostenstruktur hat darüber hinaus eine einheitliche Erfassung von realen Daten sicherzustellen. Die daraus resultierende Vergleichbarkeit mit anderen Bauwerken soll dazu beitragen, weitere Substitutionspotentiale und Verbesserungsmöglichkeiten – beispielsweise durch Umsetzung des Benchmarking-Gedankens – zu erschließen.

Die Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung als Entscheidungsgrundlage ist, bis auf wenige Ausnahmen, ausschließlich auf die Planungsphase von Neubau- bzw. größeren Umbau- oder Instandsetzungsmaßnahmen ausgerichtet. Die Generierung von Optimierungsansätzen und Verbesserungsmöglichkeiten ist letztlich auf wenige Zeitpunkte im Lebenszyklus von Tunnelbauwerken beschränkt.

Wie kann eine kontinuierliche Optimierung der Gesamtkosten von Tunnelbauwerken umgesetzt werden?

Aus der Betriebswirtschaft ist eine Vielzahl an Werkzeugen bekannt, die eine dauerhafte Verbesserung von Prozessen anstreben. Für eine praxisbezogene Anwendbarkeit hat ein entsprechender kontinuierlicher Verbesserungsprozess das zu entwickelnde Lebenszykluskostenmodell und die zugehörige Methodik aufzugreifen. Insbesondere die konsistente Kostenstruktur gilt es zu implementieren, um Vergleichbarkeit und Transparenz zu gewährleisten. Gleichzeitig soll durch die einheitliche und kontinuierliche Datenerfassung eine vertiefte Kenntnis über das Bauwerk und die zugehörigen Prozesse entstehen.

Zur Umsetzung der Anforderungen in einer eigenständigen, neu zu entwickelnden Methodik und des dazu notwendigen Lebenszykluskostenmodells sind im nächsten Schritt, die dafür erforderlichen Grundlagen aus den Bereichen der Lebenszykluskostenrechnung, Investitionsrechnung und Risikoanalyse zu erarbeiten. Für die Verwirklichung einer kontinuierlichen Optimierung gilt es, sich mit dem Thema Benchmarking auseinanderzusetzen.

Ausgehend von den theoretischen Grundlagen, wird in den weiteren Abschnitten eine Methodik entwickelt und verifiziert, die eine aktive, ganzheitliche Optimierung der Lebenszykluskosten ermöglicht. In Ermangelung eines geeigneten Lebenszykluskostenmodells ist vorab ein auf die Zielstellung ausgerichtetes Modell zu entwickeln. Die aus der Praxis bzw. der Forschung vorliegenden Erkenntnisse gilt es, sowohl für das Modell als auch für die Methodik, zu berücksichtigen.

Für die Bestimmung der Herstellkosten bzw. zur Auswahl des Bauverfahrens existieren bereits fundierte wissenschaftliche Modelle. Hier sei auf die Arbeiten beispielsweise von STEIGER¹³⁸, ISAKSSON¹³⁹ verwiesen. Die mit entsprechenden Modellen bestimmten Kosten können als Eingangsgrößen für das mit dieser Arbeit entwickelte Lebenszykluskostenmodell sowie die damit in Verbindung stehende Methodik herangezogen werden. Der Fokus der vorliegenden Arbeit richtet sich aus diesem Grund auf die Bestimmung der Folgekosten unter Einbeziehung der Herstellkosten zur ganzheitlichen ökonomischen Optimierung von Straßentunneln.

¹³⁸ vgl. STEIGER (2009); siehe auch Abs. 2.2.1

¹³⁹ vgl. ISAKSSON (2002)

3 Grundlagen der Lebenszykluskostenrechnung

Vor der eigentlichen Entwicklung zur Umsetzung der Zielstellung sind die notwendigen Grundlagen für die Lebenszykluskostenrechnung zu erarbeiten. Dazu sind die einzelnen Begrifflichkeiten in Bedeutung und Auslegung für das weitere Vorgehen abzugrenzen. Die bislang entwickelten Ansätze sind in Verbindung mit der Investitionsrechnung auf ihre Anwendbarkeit für die verfolgte Zielstellung zu untersuchen. Zusätzlich sind für eine Einbindung der Unsicherheiten in die Lebenszykluskostenrechnung die Grundlagen zu erarbeiten und das im Hinblick auf die Zielstellung geeignetste Verfahren zu bestimmen und zu erläutern.

3.1 Konzept der Lebenszykluskostenrechnung

Der Ursprung der Lebenszykluskostenrechnung in der heutigen Form lässt sich auf das Ende der Weltwirtschaftskrise um 1930 datieren. Das amerikanische General-Accounting Office (GAO) hat zur Anschaffung von Landmaschinen vorgegeben, Wartungs- und Betriebskosten – neben den reinen Anschaffungskosten – in die Entscheidungsfindung einzubeziehen. Später führte die durch den zweiten Weltkrieg verursachte Ressourcenknappheit zu einer Verbreitung der Methodik. Mitte der 1960er Jahre wurden die bisherigen Ansätze erstmals als eigenständiges Verfahren aufgefasst und durch den Begriff „Life-Cycle Costing“ (LCC) geprägt. Besonders die für sehr hohe Folgekosten bekannten militärischen Anlagen führten dazu, dass die Systematik weiterentwickelt und schließlich auch für bauliche Anlagen Anwendung fand. In Europa wurde das Bewusstsein für die ganzheitliche Denkweise des Lebenszykluskonzeptes durch die steigenden Energiepreise – ausgelöst durch die Ölkrise in den 1970er Jahren – geweckt.¹⁴⁰

Das Konzept der Lebenszykluskostenrechnung verfolgt die Zielstellung, die während der gesamten Lebensdauer anfallenden Kosten vollumfänglich zu erfassen und zu optimieren.¹⁴¹ Das bedeutet, dass nicht allein die Kosten, die zur Herstellung bzw. zum Erwerb eines Systems aufzuwenden sind, in die Investitionsentscheidung einfließen. Vielmehr gilt es, auch die aus Betrieb und Verwertung resultierenden Kosten zu berücksichtigen. Dabei geht die Lebenszykluskostenrechnung über die eigentliche Investitionsrechnung hinaus.¹⁴² Es handelt sich nicht um ein eigenständiges Verfahren. Die Lebenszykluskostenrechnung setzt sich vielmehr aus unterschiedlichen Methoden zusammen, mit dem Ziel, eine aktive Optimierung der Gesamtkosten zu erreichen.¹⁴³

Grundlegend für die Lebenszykluskostenphilosophie ist das Verständnis über den Lebenszyklus eines Systems bzw. Bauwerks. Hierfür sind Modelle aufzustellen, die die Wirklichkeit möglichst realitätsnah abbilden.¹⁴⁴ Die Erstellung solcher Modelle muss auf den zu untersuchenden Gegenstand sowie auf die Zielstellung ausgerichtet werden.¹⁴⁵ Als Grundlage zur Entwicklung eines eigenständigen Lebenszykluskostenmodells werden in den nachfolgenden Abschnitten wesentliche Ansätze und Begrifflichkeiten zur Lebenszykluskostenrechnung erläutert und diskutiert sowie für die weitere Bearbeitung eingegrenzt.

¹⁴⁰ Der geschichtliche Ursprung der Lebenszykluskostenrechnung wurde mit Hilfe der Arbeiten von WÜBBENHORST (1984), S. 9 f. und HERZOG (2005), S. 18 f. aufbereitet. Die diesen Arbeiten zugrundeliegende Primärliteratur konnte im Zuge der vorliegenden Arbeit nicht bezogen werden.

¹⁴¹ vgl. WÜBBENHORST (1984), S. 2; GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997), S. 900

¹⁴² vgl. PFOHL, WÜBBENHORST (1982), S. 4; FRÖHLING, SPILKER (1990), S. 74 f.

¹⁴³ vgl. BLANCHARD (1978), S. 11; PFOHL, WÜBBENHORST (1982), S. 4; FÜRNRÖHR (1992), S. 14

¹⁴⁴ vgl. DIN EN 60300-3-3 (2005), S. 11 f.

¹⁴⁵ vgl. HERZOG (2005), S. 6

3.1.1 Lebenszyklus

Der Begriff „Zyklus“ leitet sich aus dem lateinischen Wort „*cyclus*“ bzw. dem altgriechischen Wort „*kýklos*“ ab und bezeichnet eine kreisförmig in sich geschlossene Folge zusammenhängender Ereignisse.¹⁴⁶ In vielen Lebenszyklusmodellen werden aus diesem Grund die einzelnen Ereignisse oder auch Phasen in einer kreisförmigen Anordnung dargestellt. Beispielhaft sei an dieser Stelle auf das zyklische Modell der GEFMA Richtlinie 100 verwiesen (Abbildung 3.1).

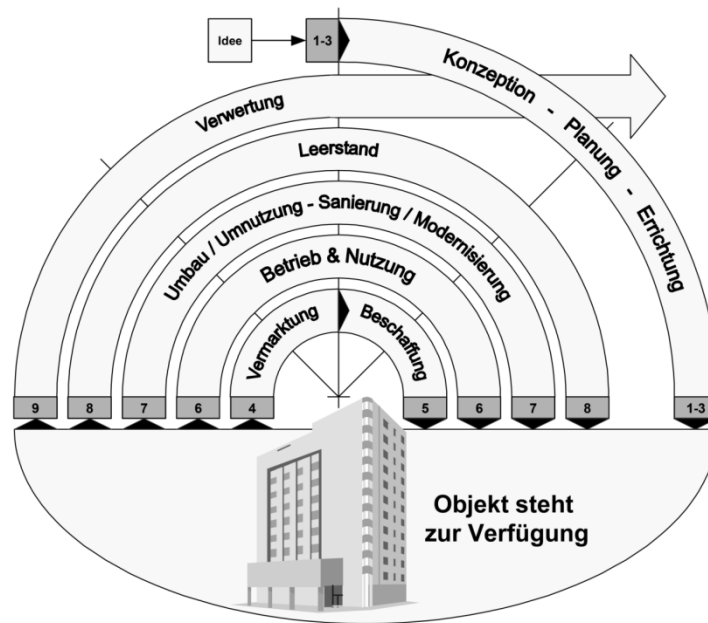


Abbildung 3.1: Lebenszyklusphasen im FM (zyklische Darstellung)¹⁴⁷

Eine eindeutige normative Definition für den Begriff „Lebenszyklus“ liegt in Deutschland bislang nicht vor. Stattdessen existiert hierfür eine Vielzahl an scheinbar unterschiedlichen Definitionen.

Beispielsweise handelt es sich nach DIN EN 15643-1 beim Lebenszyklus um „(...) *alle aufeinander folgenden und miteinander verbundenen Phasen der Lebensdauer des betrachteten Gegenstands*“.¹⁴⁸

Die GEFMA hat den Begriff als „*sich wiederholende Abfolgen zeitlicher Abschnitte (Lebenszyklusphasen) in der Entstehung, Nutzung und Verwaltung von Facilities*“ definiert.¹⁴⁹

Allen Ansätzen ist gemein, dass es sich beim Lebenszyklus um ein konsekutives Phasenmodell handelt, mit dem Ziel, den Betrachtungsgegenstand zeitlich zu strukturieren und abzubilden. Einzig die Anzahl der zu durchlaufenden Phasen und somit der Detaillierungsgrad bzw. Verwendungszweck differiert.

RUDLOFF postuliert, dass anstelle der Auslegung als Kreislauf vom Werden und Vergehen eine Interpretation als geradliniger Verlauf von Beginn bis Ende für das Bauwesen sinnvoller wäre.¹⁵⁰

¹⁴⁶ vgl. DUDEN (1997), S. 863; DUDEN (2006), S. 1159

¹⁴⁷ GEFMA 100-1 (2004), S. 6

¹⁴⁸ DIN 15643-1 (2010), S. 12

¹⁴⁹ GEFMA 100-1 (2004), S. 4

¹⁵⁰ vgl. RUDLOFF (2010), S. 9

Dieser Ansicht ist grundsätzlich zuzustimmen. Bei einer Lebenszyklusbetrachtung wird in den meisten Fällen nur eine einzige Lebensdauer des zu untersuchenden Gegenstandes betrachtet. WÜBBENHORST spricht von einer „Klammer um das System“¹⁵¹ und unterstreicht somit die These von RUDLOFF, dass von einer einzelnen Lebensspanne anstelle eines Kreislaufes auszugehen ist. DIN 14040 verwendet hierfür den bildlichen Begriff „Lebensweg“.¹⁵² Es wird auch der Begriff „Lebensdauer“ (synonym zum Wort „Lebenszyklus“), was der englischen Übersetzung des Wortes „life cycle“ entspricht, verwendet.

Der Begriff „Lebenszyklus“ hat jedoch eine über seine technische Definition hinausgehende Symbolik. Im Allgemeinen wird durch die kreisförmige Darstellung eine in sich geschlossene und somit ganzheitliche Betrachtung assoziiert. Genau dies ist auch der Grundgedanke der Lebenszyklusphilosophie, weshalb der Begriff „Lebenszyklus“ seine Berechtigung hat und an dieser Stelle weiter Verwendung findet.

Grundsätzlich bleibt festzuhalten, dass der Begriff Lebenszyklus ein Konzept repräsentiert, bei dem sämtliche Phasen – von der Entstehung bis zur Verwertung – in die Betrachtungen eines Gegenstandes mit einbezogen werden. Er bildet den Grundgedanken einer ganzheitlichen Betrachtungsweise durch Einbeziehung aller Elemente. Wesentlicher Vorteil einer solchen ganzheitlichen Sichtweise ist die Möglichkeit, Zusammenhänge und Interdependenzen über alle Lebensphasen hinweg zu erkennen und zu nutzen, beispielsweise durch Umsetzung von Optimierungs- bzw. Substitutionspotentialen.

3.1.2 Lebenszyklusphasen

Mit dem Begriff „Lebenszyklus“ geht – wie bereits gezeigt – eine Einteilung des Lebensweges in einzelne Phasen, sogenannte Lebenszyklusphasen, einher. Eine allgemeingültige Festlegung der den Lebenszyklus repräsentierenden Phasen existiert bis dato nicht. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass durch die Vielzahl der möglichen Betrachtungsobjekte und die damit zwangsläufig verbundene Heterogenität, eine Standardisierung der Phasen nicht zielführend ist.¹⁵³ In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze, die Anzahl und Ausgestaltung der einzelnen Lebensphasen für die unterschiedlichen Zielgegenstände zu strukturieren und zu vereinheitlichen.

Wesentlich ist die von WÜBBENHORST vorgeschlagene, branchenübergreifende Unterteilung des Lebenszyklus in fünf übergeordnete Lebenszyklusphasen:¹⁵⁴

- Initiierung
- Planung
- Realisierung bzw. Herstellung
- Betrieb
- Stilllegung

Aufgrund des allgemeingültigen und universell verwendbareren Ansatzes greifen viele Entwicklungen dieses Phasenmodell als Grundlage für weitere Untersuchungen auf.¹⁵⁵

¹⁵¹ vgl. WÜBBENHORST (1984), S. 50

¹⁵² DIN EN ISO 14040 (2006), S. 7

¹⁵³ vgl. FÜRNRÖHR (1992), S. 9

¹⁵⁴ vgl. WÜBBENHORST (1984), S. 55, in Anlehnung an WILDEMANN: *Kostenprognosen bei Großprojekten*. Stuttgart, 1982

¹⁵⁵ beispielsweise PELZETER (2006), RUDLOFF (2010) oder auch STICHNOTH (2010)

ISO/FDIS 15686-5, als Ansatz einer Vereinheitlichung der Lebenszyklusstrategien im Bauwesen, komprimiert den Lebenszyklus in drei Grundphasen, wobei an anderer Stelle die Planungsphase als vierte Phase ergänzt wird.¹⁵⁶

„The life cycle comprises all stages from construction, operation and maintenance to end-of-life, including decommissioning, deconstruction and disposal.“¹⁵⁷

In den letzten Jahren wurden speziell im Bereich des Ingenieurbaus für sich eigenständige Modelle entwickelt, die im Wesentlichen auf dem Grundmodell (vgl. WÜBBENHORST) basieren. Beispielsweise fassen GRAUBNER, KNAUFF, PELKE für Brückenbauwerke die Phasen bis zur Fertigstellung des Bauwerkes zur Herstellungsphase zusammen. Daran schließen die Phasen Betrieb und Entsorgung an.¹⁵⁸ Demensprechend sind auch hier fünf Phasen zu erkennen. Ähnliches findet sich bei JODL¹⁵⁹ bzw. SCHACH ET AL.¹⁶⁰ und den dort jeweils vorgestellten Lebenszykluskostenmodellen für Straßenbrücken.

VOGT greift für Tunnelbauwerke ebenfalls das Grundkonzept mit fünf Phasen auf. Die Phasen der Initiierung und der Planung werden dabei als Phase A (Entwicklung) zusammengefasst und im späteren Lebenszykluskostenmodell mit der Bauphase (Phase B) aggregiert. Phase C stellt die Betriebsphase und Phase D die Verwertungsphase dar.¹⁶¹

SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER unterteilen den Lebensweg von Tunnelbauwerken ebenfalls in vier aufeinander aufbauenden Phasen (Planung, Herstellung, Nutzung und Rückbau/Revitalisierung).¹⁶²

Trotz der Vielzahl an unterschiedlichen Phasenmodellen für den Lebenszyklus ist allen Modellen gemein, dass die Phasen konsekutiv angeordnet sind und sich gegenseitig beeinflussen. Die für die einzelnen Modelle gewählten Einteilungen des Lebenszyklus basieren im Wesentlichen auf unterschiedlichen Überlegungen hinsichtlich des Untersuchungsgegenstands, des Untersuchungsziels sowie des gewünschten Detaillierungsgrads. Der Grund, weshalb nicht alle Bauwerke einer identischen Zyklusstruktur unterliegen, ist auf die unterschiedlichen Anforderungen aus der Nutzung zurückzuführen. Während Ingenieurbauwerke fast ausschließlich auf Funktionalität und Sicherheit ausgelegt sind, unterliegen Immobilien, durch wechselnde Nutzer bzw. Veränderung der Nutzung, immer neuen Anforderungen. Im Gegensatz dazu finden Tunnel und Brücken, oder allgemein Ingenieurbauwerke, in aller Regel bis zum Ende ihres Nutzungszeitraumes die ihnen angedachte Verwendung. Lediglich der Nutzungszeitraum kann sich durch bauwerkserhaltende Maßnahmen verlängern. Im Falle von Tunnelbauwerken betreffen solche Maßnahmen überwiegend die Tunnelausstattung mit Betriebs- und Sicherheitstechnik, die fortlaufend modernisiert bzw. dem Stand der Technik und den steigenden Sicherheitsanforderungen angepasst werden muss.

¹⁵⁶ vgl. ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 8

¹⁵⁷ ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 4

¹⁵⁸ vgl. GRAUBNER, KNAUFF, PELKE (2011), S. 165

¹⁵⁹ vgl. JODL (2010), S. 224

¹⁶⁰ vgl. SCHACH ET AL. (2006), S. 346

¹⁶¹ vgl. VOGT (2012), S. 59; gleichlautend auch in THEWES, VOGT (2011) bzw. VOGT, THEWES (2012)A

¹⁶² vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER (2012), S. 1009

Es bleibt festzuhalten, dass, unabhängig ihrer Herkunft bzw. ihres Verwendungszwecks, alle vorgestellten Modelle aus dem Bereich des Bauwesens auf eine Grundstruktur des Lebenszyklus von fünf Phasen zurückzuführen sind. Die Phasen Initiierung und Planung werden dabei häufig zu einer Phase zusammengeführt, so dass allgemein von einem Vier-Phasen-Modell auszugehen ist:

- Initiierung / Planung
- Errichtung / Herstellung
- Nutzung / Betrieb
- Abbruch / Rückbau / Stilllegung / Verwertung

Wird des Weiteren die Planungs- und Herstellungsphase mit den Leistungsphasen der HOAI überlagert, ist augenscheinlich, dass sich der Planungsprozess (zumindest in Deutschland) kaum vom Herstellungsprozess abgrenzen lässt (Abbildung 3.2). Dies wird dadurch unterstützt, dass in Deutschland in vielen Fällen die Ausführungsplanung zeitgleich mit der Bauwerkserstellung erfolgt. Eine Zusammenführung der beiden Phasen und somit eine Reduktion auf drei Phasen liegt nahe.

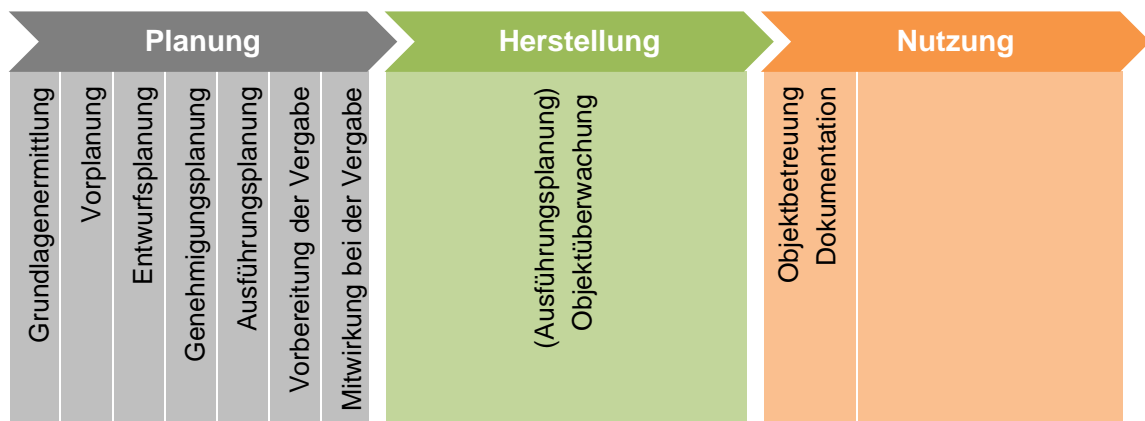


Abbildung 3.2: Überlagerung der Leistungsphasen der HOAI mit den Lebenszyklusphasen¹⁶³

Für die Betrachtungen eines Tunnelbauwerkes hinsichtlich seines Lebenszyklus ist es zielführend, sich auf die drei wesentlichen Lebenszyklusphasen zu konzentrieren (Abbildung 3.3). Die Phase der Herstellung wird dabei nochmals in die Prozesse der Planung und der eigentlichen Errichtung (Umsetzung) des Bauwerkes unterteilt. Durch die in vielen Fällen zeitgleiche Planung und Ausführung sind diese beiden Teilphasen überlappend anzuordnen (siehe auch Abbildung 3.2).

Für die Nutzungsphase wird eine Unterteilung in die wesentlichen Prozesse (Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Erneuerung, Modernisierung, Reinigung und Versorgung) vorgeschlagen. Anders als in zahlreichen Quellen bisher postuliert, lassen sich diese Prozesse in der Realität untereinander kaum abgrenzen.¹⁶⁴ Sie treten in unstrukturierter Reihenfolge vermehrt über den Nutzungszeitraum eines Tunnelbauwerkes auf.¹⁶⁵ Eine Umnutzung, wie dies bei Hochbau-Immobilien sehr häufig der Fall ist, kann für Tunnelbauwerke während der Nutzungsphase ausgeschlossen werden. Vielmehr ist eine Nutzungsänderung für einen Straßentunnel mit dem eigentlichen Ende seiner Nutzungsdauer verbunden und sollte deshalb in der Verwertungsphase Berücksichtigung finden.

¹⁶³ in Anlehnung an STARK (1985), S. 53

¹⁶⁴ vgl. RIEGEL (2004), S. 9

¹⁶⁵ vgl. RIEGEL (2004), S. 9 ff. oder auch RUDLOFF (2010), S. 58 ff.

Das Hauptaugenmerk der Verwertungsphase richtet sich auf die Revitalisierung. Im Gegensatz zu Immobilien ist zur Herstellung des eigentlichen Tunnelbauwerks eine Vielzahl von Bauhilfsmaßnahmen, wie z. B. der Tunnelvortrieb mit Ausbruch und Sicherung, zu erbringen. Dies führt dazu, dass ein vollständiger Rückbau und ein konsekutiver Neubau an gleicher Stelle die Ausnahmen darstellen. Stattdessen werden Tunnelbauwerke bzw. dessen Tragkonstruktion im Zuge von grundlegenden Sanierungen (sog. Revitalisierungen) den neuen Anforderungen angepasst.¹⁶⁶ In vielen Fällen erfolgt ein vollständiger Austausch der Innenschale. Der Lebenszyklus und damit auch die Lebensdauer beginnen letztlich wieder von Neuem (Abbildung 3.3).¹⁶⁷

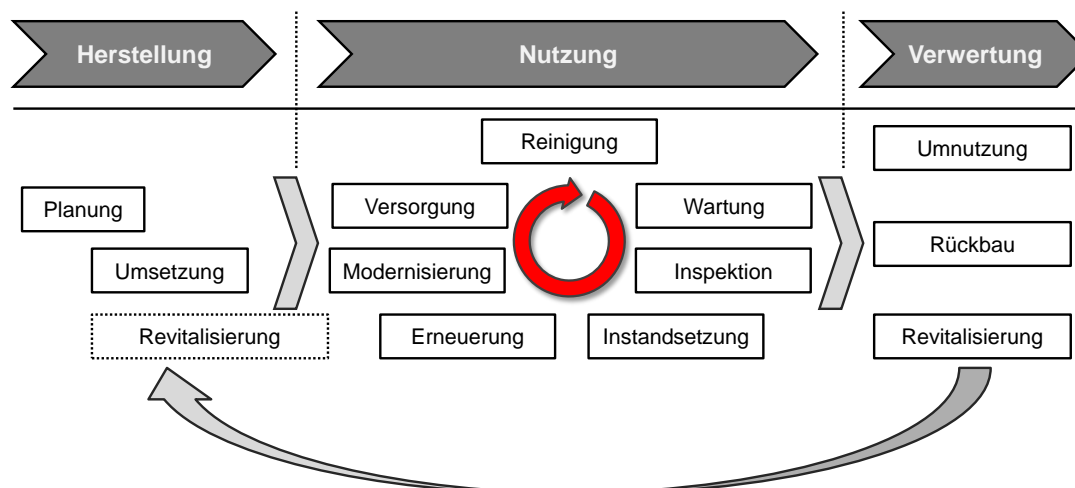


Abbildung 3.3: Lebenszyklusphasen eines Tunnelbauwerkes¹⁶⁸

3.1.3 Lebenszykluskosten

In den Betriebs- und Ingenieurwissenschaften ist kein kongruentes Verständnis über den Begriff „Kosten“ festzustellen. Dies macht es erforderlich, vor der Erläuterung der Lebenszykluskosten, den Kostenbegriff zu erörtern.

3.1.3.1 Kosten

Der Begriff „Kosten“ ist in der Literatur unterschiedlich definiert. Im üblichen betriebswirtschaftlichen Sprachgebrauch findet der auf SCHMALENBACH zurückgehende wertmäßige Kostenbegriff Verwendung. Dieser definiert Kosten als „(...) *bewerteter Verbrauch von Gütern und Dienstleistungen für die Herstellung und den Absatz von betrieblichen Leistungen und die Aufrechterhaltung der dafür erforderlichen Kapazitäten*“.¹⁶⁹

Bezogen auf die vorliegende Aufgabenstellung würde dies bedeuten, dass, entsprechend der betriebswirtschaftlichen Definition zur Errichtung eines Tunnelbauwerkes keine Kosten anfallen. Erst durch die Bereitstellung und den Betrieb wären durch den Wertverzehr (Abschreibung) Kosten zu verzeichnen.

¹⁶⁶ vgl. HAACK (2011), S. 9

¹⁶⁷ Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurde hierzu eine eigenständige Systematik entwickelt (Abs. 6.3).

¹⁶⁸ ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 475 oder auch THEWES ET AL. (2013)A, S. 244

¹⁶⁹ WÖHE (2000), S. 1103

Im Gegensatz dazu hat sich im Bauwesen, beispielsweise in DIN 276-1, der Kostenbegriff als „Aufwendungen für Güter, Leistungen, Steuern und Abgaben, die für die Vorbereitung, Planung und Ausführung von Bauprojekten erforderlich sind“ durchgesetzt.¹⁷⁰ Auch DIN EN 1325 definiert den Begriff Kosten abweichend als „Ausgaben, die einem gegebenen Produkt zugeordnet werden oder bei diesem anfallen“.¹⁷¹

Das bedeutet, dass es sich hierbei um tatsächlich getätigte Ausgaben (Zahlungen bzw. Verbindlichkeiten) handelt. Von einem Verzehr von Gütern bzw. Dienstleistungen, entsprechend der Definition von WÖHE, kann dabei allerdings nicht ausgegangen werden. Vielmehr führen Ausgaben zu einer Verringerung des Geldvermögens und sind Teil der Finanzrechnung.¹⁷² In der Betriebswirtschaft ist hierfür der Begriff der pagatorischen Kosten vorgesehen (Abbildung 3.4).¹⁷³

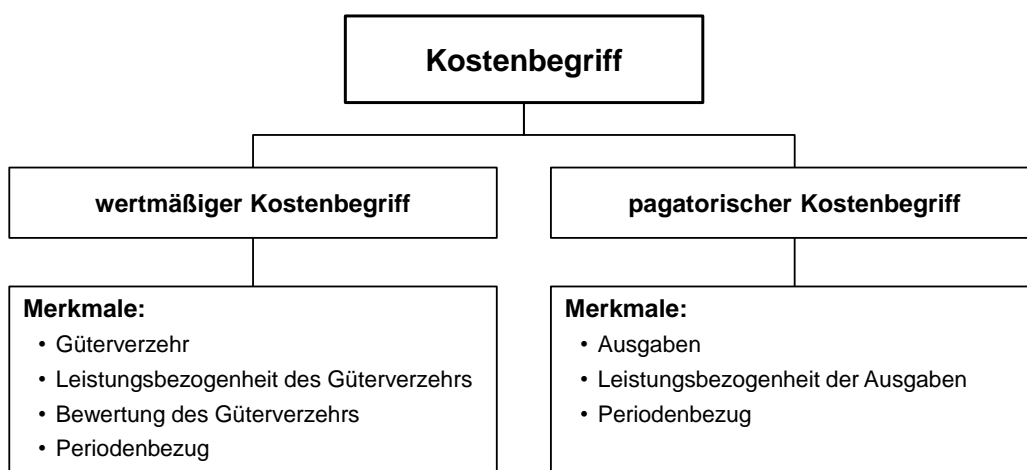


Abbildung 3.4: Differenzierung der Kostenbegriffe¹⁷⁴

Da Kosten und Ausgaben nicht immer zeitlich übereinstimmen müssen bzw. ein Güterverzehr nicht zwingend mit Ausgaben verbunden sein muss, wäre der Begriff „Lebenszykluskosten“ aus betriebswirtschaftlicher Sichtweise unzutreffend. Vielmehr müsste die Begrifflichkeit „Lebenszyklusausgaben“ Verwendung finden. Bereits WÜBBENHORST, FRÖHLING und SPILKER, ZAUNER, HERZOG oder PELZETER weisen auf diese Unschärfe hin.¹⁷⁵ Aufgrund der tiefen Verankerung im allgemeinen Sprachgebrauch und um die damit verbundenen Verwirrungen bei einer Änderung des Begriffes zu vermeiden, wird in dieser Arbeit der Begriff „Lebenszykluskosten“ synonym zum Begriff „Lebenszyklusausgaben“ verwendet.

3.1.3.2 Lebenszykluskosten

Für den Begriff „Lebenszykluskosten“ finden sich in der Literatur vermeintlich differenzierte Definitionen. Nach BLANCHARD umfassen die Lebenszykluskosten beispielsweise alle Kosten, die mit einem System und dessen Lebenszyklus in Verbindung stehen.¹⁷⁶

¹⁷⁰ DIN 276-1 (2008), S. 4

¹⁷¹ DIN EN 1325 (2011), S. 7

¹⁷² vgl. WÖHE (2000), S. 863; OSSADNIK (2008), S. 17 ff.

¹⁷³ vgl. WÖHE (2000), S. 1103

¹⁷⁴ in Anlehnung an OSSADNIK (2008), S. 21

¹⁷⁵ vgl. WÜBBENHORST (1984); FRÖHLING, SPILKER (1990); ZAUNER (2003); HERZOG (2005); PELZETER (2006)

¹⁷⁶ vgl. BLANCHARD (1978), S. 9;

„Life cycle cost refers to all costs associated with the system (...) and applied to the defined life cycle.“

STARK definiert diese als „(...) ganzheitliche Betrachtung von Erst- und Folgekosten (...).“¹⁷⁷ ZAUNER legt die Lebenszykluskosten „(...) als Summe der Objektentwicklungskosten, Objektterrichtungskosten, Objektnutzungskosten und Objektbeseitigungskosten (...)“ fest.¹⁷⁸ Nach HERZOG umfassen die Lebenszykluskosten „(...) die Summe aller Kosten, die das Gebäude über den Lebenszyklus von der Erstellung bis zu seiner Verwertung verursacht (...)“.¹⁷⁹ Dabei sind auch externe Kosten, wie beispielsweise volkswirtschaftliche Kosten, mit einzubeziehen.¹⁸⁰ THEWES und VOGT erweitern den Betrachtungsrahmen ebenfalls und beziehen die aus der Nutzung erzielten Einnahmen in die Lebenszykluskosten ein.¹⁸¹

Abgesehen von den Erweiterungen von HERZOG bzw. THEWES und VOGT stimmen alle angeführten Definitionen mit Begriffserläuterung gemäß ISO/FDIS 15686-5 überein:

Life-Cycle Cost (LCC)

„Cost of an asset or its parts throughout its life cycle, while fulfilling the performance requirements.“¹⁸²

Allerdings gilt zu beachten, dass der englische Begriff „Life-Cycle Cost“ international gesehen nicht unbedingt synonym zum Begriff „Lebenszykluskosten“ Verwendung findet. In Kanada und Großbritannien beispielsweise steht LCC für die Gesamtkosten auf Bauteilebene. Die eigentlichen Lebenszykluskosten des Gesamtobjektes werden als Whole-Life Cost (WLC) bezeichnet. Im Hinblick auf die Standardisierung ist dieser Begriff irreführend. Nach ISO/FDIS 15686-5 umfassen die Whole-Life Cost neben den Lebenszykluskosten auch weitere Kosten, wie z. B. externe Kosten oder auch Einnahmen (Abbildung 3.5).¹⁸³

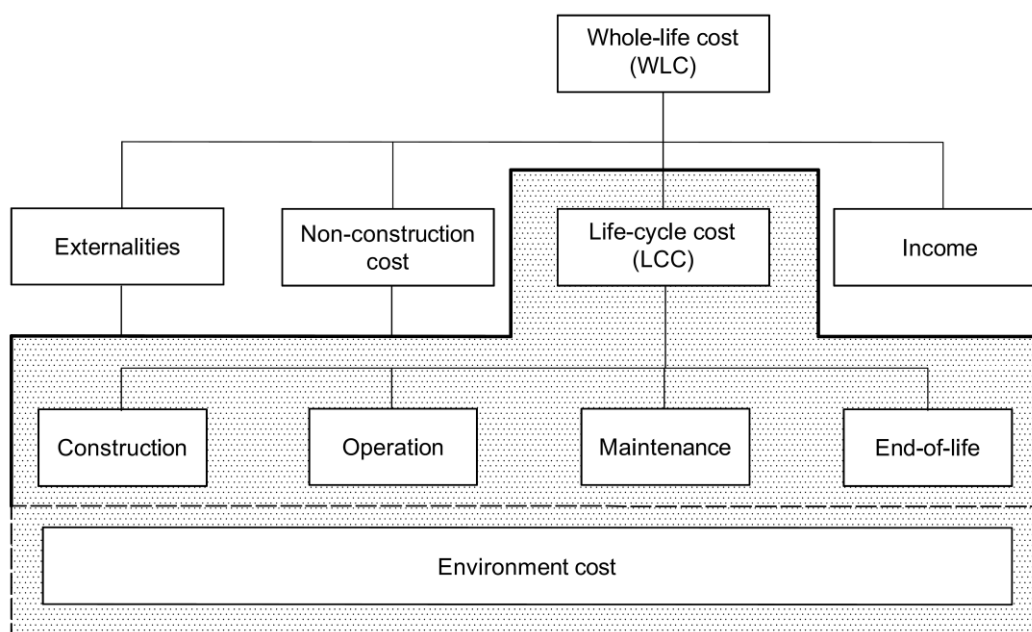


Abbildung 3.5: Bestandteile von WLC und LCC¹⁸⁴

¹⁷⁷ STARK (1985), S. 51

¹⁷⁸ ZAUNER (2003), S. 18

¹⁷⁹ HERZOG (2005), S. 39

¹⁸⁰ vgl. HERZOG (2005), S. 39

¹⁸¹ vgl. THEWES, VOGT (2010), S. 317

¹⁸² ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 2

¹⁸³ vgl. ISO/FIS 15686-5 (2008), S. 6

¹⁸⁴ ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 6

Die Vielzahl an international ähnlichen Begriffen hat CLIFT in einer Aussage zusammengefasst:

*„Use of the designation “life-cycle costing” has changed over a number of years. It has also variously been called whole-life costing, terotechnology, through-life costing, costs-in-use, total-cost-of-ownership, total-life costing, ultimate life cost and total cost.“*¹⁸⁵

Bei dieser Aufstellung ist zu berücksichtigen, dass Begriffe mit differenzierter Bedeutung gleichgestellt werden. So steht „Life-Cycle Costing“, das fälschlicherweise häufig dem deutschen Begriff „Lebenszykluskosten“ gleichgesetzt wird, für die eigentliche Analyse der Lebenszykluskosten oder auch Lebenszykluskostenrechnung.

Die Grundidee der Lebenszykluskostenbetrachtung liegt darin, die Kosten eines Systems, inklusive seiner Folgekosten, zu optimieren.¹⁸⁶ Dahinter steht der Leitgedanke des ökonomischen Prinzips hinsichtlich einer Zielerreichung mit möglichst geringem Mitteleinsatz (Minimalprinzip).¹⁸⁷ An diesem Grundprinzip wird für die vorliegende Arbeit festgehalten. Die Lebenszykluskosten entsprechen der Summe aller Auszahlungen (bzw. Kosten – entsprechend der Begriffsdefinition nach Abs. 3.1.3.1), die für das Tunnelbauwerk über sämtliche Phasen seines Lebenszyklus anfallen.¹⁸⁸ Erst durch eine entsprechende Verknüpfung von Kosten mit dem Lebenszyklusmodell wird eine kausale Zuordnung der Kosten auf den Anfallszeitpunkt ermöglicht. Vorhandene Interdependenzen zwischen den einzelnen Phasen lassen sich dadurch erkennen und nutzen.

Allgemein setzen sich die Lebenszykluskosten aus der Summe Erst- und Folgekosten zusammen.¹⁸⁹ Entsprechend der Festlegung des Lebenszyklus von Tunnelbauwerken (Abs. 3.1.2) umfassen die Erstkosten, die bis zur Inbetriebnahme anfallenden Kosten aus Planung und Errichtung. Alle nach der Inbetriebnahme anfallenden Kosten sind als Folgekosten zu subsumieren und gliedern sich in Nutzungs- und Verwertungskosten.¹⁹⁰

3.1.4 Lebenszykluskostenanalyse

Die Lebenszykluskostenanalyse (LCCA) oder Lebenszykluskostenrechnung (Life-Cycle Costing) ist eine Methodik mit dem Ziel eine ganzheitliche Kostenoptimierung umzusetzen.¹⁹¹ Es handelt sich dabei nicht um eine eigenständige Vorgehensweise. Vielmehr finden neben der Investitionsrechnung weitere unterschiedliche Arbeitstechniken Anwendung, insbesondere aus der Betriebswirtschaftslehre.¹⁹² Anders als bei der Investitionsrechnung üblich, wo Zahlungen als passive Eingangsgröße verstanden werden, zielt die Lebenszykluskostenanalyse allerdings auf eine aktive Gestaltung der Kosten ab.¹⁹³ Dies bedeutet, dass durch eine gezielte Steuerung der Kosten eine Optimierung angestrebt wird (Abbildung 3.6). Dazu notwendig ist die Kenntnis, welche Parameter Einfluss auf die Kosten besitzen und wie sich die Kostenelemente gegenseitig bedingen.

¹⁸⁵ CLIFT (2003), S. 37

¹⁸⁶ vgl. GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997), S. 902

¹⁸⁷ vgl. WOLL (2003), S. 60

¹⁸⁸ Grundsätzlich wären dabei Einnahmen wie Ausgaben mit umgekehrt Vorzeichen zu betrachten, so dass diese jederzeit in das Modell integriert werden können.

¹⁸⁹ vgl. RIEGEL (2004), S. 18; WÜBBENHORST (1984), S. 70; ZEHBOLD (1996), S. 94

¹⁹⁰ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER (2012), S. 1019

¹⁹¹ vgl. SHERIF, KOLARIK 1981, S. 287

¹⁹² vgl. GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997), S. 900

¹⁹³ vgl. WÜBBENHORST (1984), S. 2

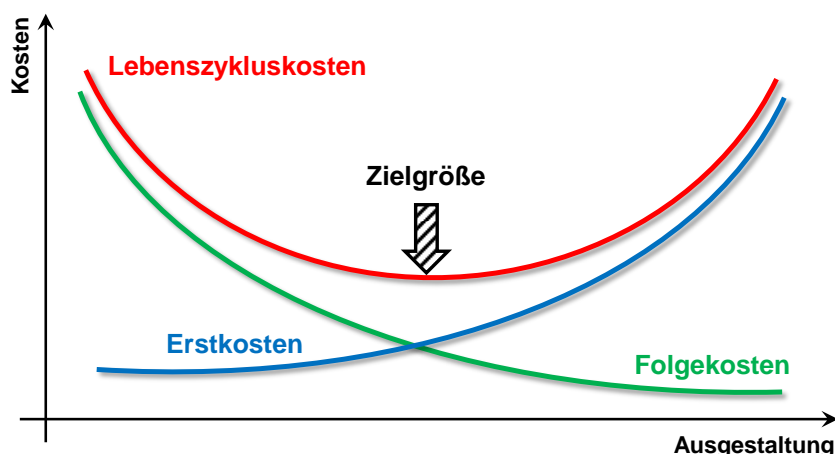


Abbildung 3.6: Ziel der Lebenszykluskostenanalyse¹⁹⁴

Die grundlegenden Berechnungsansätze für die Lebenszykluskostenberechnung sind der Investitionsrechnung entnommen (siehe hierzu Abs. 3.1.5). Je nach Zielstellung können unterschiedliche Arten der Investitionsrechnung für die Bestimmung der Gesamtkosten vorteilhaft sein. Allerdings ist besonders beim Vergleich von unterschiedlichen Ausführungsalternativen der zeitliche Anfall der Kosten von entscheidender Bedeutung. Um die zeitliche Gewichtung der Kosten berücksichtigen zu können, sind in der Regel die Methoden der dynamischen Investitionsrechnung zu bevorzugen.¹⁹⁵

Neben der Bestimmung der Gesamtkosten über die Investitionsrechnung sind weitere Ansätze für eine holistische Betrachtungsweise bei der Lebenszykluskostenrechnung einzubinden. Beispielsweise Methoden der Kostenprognose für die in die Zukunft gerichtete Abschätzung der Kosten oder Sensitivitätsanalysen zur Abschätzung der Sensibilität der Lebenszykluskosten und zur Identifikation der wesentlichen Einflussparameter. Zugleich dient die Sensitivitätsanalyse einer ersten Risikoeinschätzung, besonders bei Modellen ohne Planungsalternativen.¹⁹⁶ Durch Variation der zumeist unsicheren Eingangswerte lassen sich Zusammenhänge von Eingangswert und Ergebnis erkennen und die Beeinflussbarkeit der Gesamtkosten abschätzen.¹⁹⁷

3.1.5 Grundlagen der Investitionsrechnung

Das Hauptziel der Lebenszykluskostenrechnung liegt in einer ganzheitlichen Kostenoptimierung. Um dies zu ermöglichen und verschiedene Planungsalternativen vergleichen zu können, kommen je nach Zielausrichtung unterschiedliche methodische Ansätze aus der Investitionsrechnung zur Anwendung. Im Fokus steht die Prognose und Bewertung des Investitionserfolgs durch Erfassung aller Ein- und Auszahlungen über den gesamten Lebenszyklus eines Investitionsobjektes.¹⁹⁸ Dabei gilt es zu beachten, dass es sich bei allen Verfahren um eine modellhafte Abbildung und somit um eine mehr oder weniger starke Vereinfachung der Realität handelt.¹⁹⁹ Eine exakte Abbildung wäre aufgrund des Aufwands und dem daraus abzuleitenden finanziellen Einsatzes nicht wirtschaftlich.²⁰⁰

¹⁹⁴ in Anlehnung an PFOHL, WÜBBENHORST (1982), S. 15

¹⁹⁵ vgl. VOGT (2012), S. 57

¹⁹⁶ vgl. GÖTZE, BLOECH (1993), S. 304

¹⁹⁷ vgl. GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997), S. 904

¹⁹⁸ vgl. WÖHE (2000), S. 626

¹⁹⁹ vgl. GÖTZE (2008), S. 36

²⁰⁰ siehe Abs. 6 – Modellbildung

Der Einsatzbereich der Investitionsrechnungsverfahren ist nicht auf die Errichtung bzw. Beschaffung, beispielsweise eines neuen Tunnelbauwerkes beschränkt. Vielmehr können auch laufende Investitionen (z. B. Austausch der Tunnelbeleuchtung) oder Ergänzungsinvestitionen (Nachrüstung einer Sprühwasserlöschanlage) mit Hilfe der Methoden der Investitionsrechnung hinsichtlich ihrer ökonomischen Vorteilhaftigkeit bewertet werden.²⁰¹ Dies lässt sich aus der allgemeingültigen Definition des Begriffes Investition herleiten:

„Investition = Zahlungsstrom, der mit einer Auszahlung beginnt.“²⁰²

In der Literatur werden die Rechenmodelle zur Bewertung der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit generell in „Modelle unter Sicherheit“ bzw. „Modelle unter Unsicherheit“ aufgeteilt. Der Unterschied ist darin begründet, dass bei den Modellen unter Sicherheit von einer Datengrundlage ausgegangen wird, die aus exakten, deterministischen Prognosewerten besteht. Diese werden auch als klassische Rechenmodelle bezeichnet und untergliedern sich weiter hinsichtlich der Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls der Zahlungen in statische und dynamische Rechenmodelle (Abbildung 3.7).²⁰³

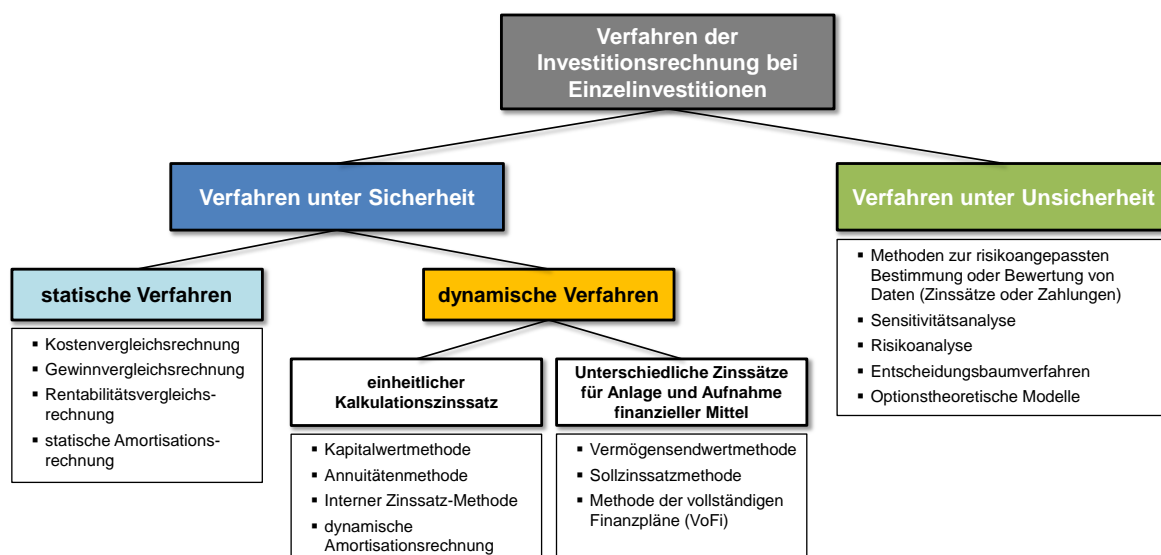


Abbildung 3.7: Verfahren der Investitionsrechnung bei Einzelinvestitionen²⁰⁴

Statische Rechenverfahren berücksichtigen einen „*durchschnittlich repräsentativen Jahreswert*“.²⁰⁵ POGGENSEE bezeichnet diese Verfahren auch als „*periodische Verfahren*“.²⁰⁶ Die vereinfachte Betrachtung schließt eine Einbeziehung zeitlicher Unterschiede beim Kostenanfall aus. Dadurch werden die unterschiedlichen Wertigkeiten von Zahlungen mit differierenden Anfallszeitpunkten vollständig vernachlässigt.

Gerade wegen der sehr langen Nutzungsdauern von Tunnelbauwerken und durch die mit der Lebenszykluskostenrechnung angestrebte Einbeziehung aller Lebensphasen in die Entscheidungsfindung eignen sich statische Rechenverfahren nur bedingt zur Auffindung der wirtschaftlichsten Lösung. Die Realität würde für die Zielstellung einer Lebenszykluskostenrechnung zu sehr vereinfacht. Aufgrund der fehlenden Eignung wird auf weitere

²⁰¹ vgl. GÖTZE (2008), S. 8 ff.

²⁰² POGGENSEE (2008), S. 11

²⁰³ vgl. GÖTZE (2008), S. 48; POGGENSEE (2011), S. 16 ff.; OTT (2011), S. 39

²⁰⁴ in Anlehnung an GÖTZE (2008), S. 70

²⁰⁵ OTT (2011), S. 40

²⁰⁶ vgl. POGGENSEE (2011), S. 39

Ausführungen an dieser Stelle verzichtet. In Abbildung 3.7 sind zur Vervollständigung beispielhaft verschiedene statische Verfahren aufgeführt.

Zahlungen in gleicher nominaler Höhe, aber mit abweichenden Anfallszeitpunkten, verfügen über unterschiedliche Wertigkeiten zu einem definierten Betrachtungszeitpunkt (Abbildung 3.8). Eine wesentliche Grundregel der Finanzmathematik legt deshalb fest, dass Zahlungen nur dann saldiert bzw. verglichen werden dürfen, sofern deren Bezugszeitpunkte übereinstimmen.²⁰⁷ Eine unmittelbare Zusammenfassung aller Zahlungen über den gesamten Lebenszyklus ist letztlich nur durch eine finanzmathematische Transformation (z. B. Auf- oder Abzinsung) möglich.²⁰⁸

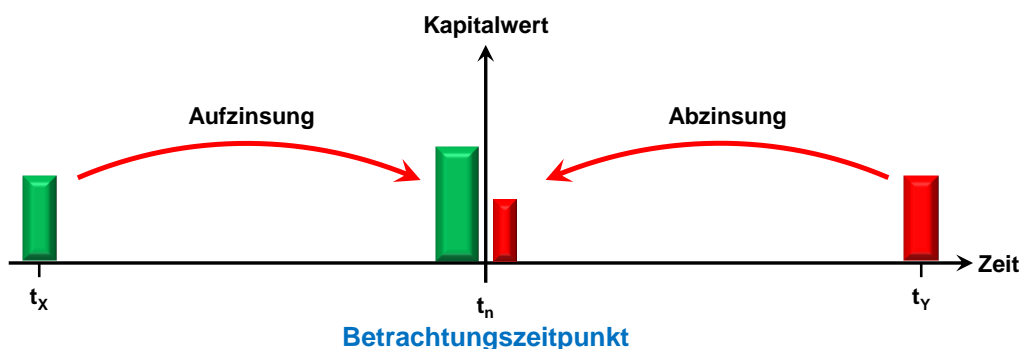


Abbildung 3.8: Wertigkeit identischer Zahlungen mit unterschiedlichem Anfallszeitpunkt

Dynamische Rechenmodelle beheben diesen Umstand und berücksichtigen explizit den zeitlichen Anfall von Zahlungen. Dadurch ist es möglich, Zahlungen aus frühen Lebensphasen (z. B. aus der Planungs- und Bauphase) mit späteren Zahlungen (beispielsweise während der Betriebs- oder Verwertungsphase) zu vergleichen. POGGENSEE spricht bei der Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls von Zahlungen durch Auf- bzw. Abzinsung von einer „Verschiebbarkeit der Zahlungen auf einem Zeitstrahl“.²⁰⁹ Die Zins- und Zinseszinsrechnung bildet letztlich die Grundlage für die dynamische Investitionsrechnung und erhöht den Realitätsbezug dynamischer Modelle gegenüber statischen Modellen.²¹⁰

GÖTZE untergliedert die Rechenmodelle der dynamischen Investitionsrechnung in zwei Gruppen: Modelle mit einheitlichem Kalkulationszinssatz und Modelle, die von unterschiedlichen Zinssätzen für die Anlage bzw. Aufnahme von finanziellen Mittel ausgehen (Abbildung 3.7). OTT teilt die beiden Gruppen – in Anlehnung an GÖTZE – ebenfalls in zwei Gruppen und bezeichnet diese als Partial- (bei einheitlichem Kalkulationszinssatz) bzw. Totalmodelle (bei abweichenden Zinssätzen).²¹¹

Die dynamische Investitionsrechnung mit einheitlichem Kalkulationszinssatz geht von einem vollkommenen Kapitalmarkt aus. Dies bedeutet, dass zu jedem Zeitpunkt unbeschränkt finanzielle Mittel aufgenommen bzw. angelegt werden können. Dadurch entstehen keine Kapitalbindungsdifferenzen. Frei werdende oder nicht benötigte Mittel können zum gleichen Zinssatz, dem Kalkulationszinssatz, investiert werden, zu dem Kapital aufgenommen werden kann.²¹² In der Finanzwissenschaft werden hierfür die Begriffe „Wie-

²⁰⁷ vgl. CARSTENSEN (2008), S. 34

²⁰⁸ vgl. GÖTZE (2008), S. 67

²⁰⁹ vgl. POGGENSEE (2011), S. 117

²¹⁰ vgl. STICHNOTH (2010), S. 115

Die finanzmathematischen Grundlagen sind in Anhang A.1 – Abs. A.1.1 erläutert.

²¹¹ vgl. OTT (2011), S. 81

²¹² vgl. GÖTZE (2008), S. 70

deranlageprämisse“ bzw. „Geldbeschaffungsprämisse“ verwendet.²¹³ Diese Annahme entspricht allerdings nicht der Realität und stellt den wesentlichen Schwachpunkt dieser Modelle dar. Sie wurde jedoch getroffen, um eine Bewertung der eigentlichen Investition und nicht des Einflusses der Finanzierung vorzunehmen.²¹⁴ Bekanntestes Rechenverfahren dieser Gruppe ist die Kapitalwertmethode.

Um die Annahme eines vollkommenen Kapitalmarktes und dem damit verbundenen einheitlichen Kalkulationszinssatz zu umgehen, wurden Rechenverfahren entwickelt, die eine Berücksichtigung unterschiedlicher Zinssätze für Anlage und Aufnahme von Kapital ermöglichen. Der Vollständige Finanzplan (VoFi) ist ein wesentlicher Vertreter dieser Berechnungsweise.

Entgegen der festgestellten Tatsache, dass durch die Kapitalwertmethode eine Einbeziehung unterschiedlicher Zinssätze ausgeschlossen ist, weisen viele Normen und Richtlinien dieses Verfahren als Grundlage für die Lebenszykluskostenrechnung aus.

Beispielsweise gibt ISO/FDIS 15686-5, als bislang einziger Versuch die Lebenszykluskosten auf internationaler Ebene zu standardisieren, für die Ermittlung der Lebenszykluskosten, und somit letztlich für die Auffindung der wirtschaftlichsten Ausführungsalternative, die Anwendung der Kapitalwertmethode (engl. net present value) vor.

„NPV is the normal measure used in an LCC analysis.“²¹⁵

DIN EN 60300-3-3 – als Anwendungsleitfaden für die Lebenszykluskosten – schlägt zur Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls der Zahlungen im Lebenszyklus ebenfalls die Kapitalwertmethode als Grundprinzip für alle modernen Methoden der Investitionsbeurteilung vor.²¹⁶ Der Leitfaden „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei PPP-Projekten“ verweist für die Bestimmung der Lebenszykluskosten bei PPP-Projekten auf die dynamische Investitionsrechnung und im Besonderen auf die Kapitalwertmethode.²¹⁷ Das Bundesministerium für Finanzen (BMF) empfiehlt in seiner „Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsrechnungen“ ebenso „(...) die Kapitalwertmethode (...) als die im Regelfall zweckmäßigste Methode (...)“.²¹⁸ Das BMF gibt gleichzeitig die Randbedingungen vor, bei der die Kapitalwertmethode anzuwenden ist.²¹⁹

- Ein- und Auszahlungen werden an mehreren voneinander abweichenden Zeitpunkten vorgenommen.
- Die anfallenden Zahlungen sind in ihrer Höhe inhomogen.
- In die Bewertung ist eine Zeitspanne von mehreren Jahren mit einzubeziehen.

Die angeführten Kriterien treffen für eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Bauwerken, insbesondere von Tunnelbauwerken und den dabei vorliegenden Randbedingungen, vollumfänglich zu. Es bietet sich deshalb an, auch für die Lebenszykluskostenrechnung von Tunnelbauwerken auf die vom BMF vorgeschlagene Berechnungsmethode zurückzugreifen.

²¹³ vgl. POGGENSEE (2011), S. 111 ff.

²¹⁴ vgl. POGGENSEE (2011), S. 112

²¹⁵ ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 26
net present value (NPV)

²¹⁶ vgl. DIN EN 60300-3-3 (2005), S. 27

²¹⁷ vgl. FMK (2006), S. 20; BERNER ET AL. (2009), S. 32

²¹⁸ BMF (2011), S. 15

²¹⁹ vgl. BMF (2011), S. 15

Die Konzentration auf die Kapitalwertmethode in den einschlägigen Normen bzw. Leitfäden ist letztlich dafür ausschlaggebend, dass zur Integration in die zu entwickelnde Methodik im Folgenden der Fokus auf dieses Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung gerichtet wird. Die spätere Methodik zur Optimierung der Lebenszykluskosten ist allerdings so auszugestalten, dass alternative Verfahren (z. B. VoFi) implementiert werden können.

3.1.6 Kapitalwertmethode

Bei der Kapitalwertmethode (als dynamisches Rechenverfahren) dient der Kapitalwert als Vergleichsgröße sämtlicher Alternativen. Zur Ermittlung des Vergleichskriteriums werden alle Ein- und Auszahlungen auf den Betrachtungszeitpunkt auf- bzw. abgezinst.²²⁰ Die Summe der ab- bzw. aufgezinster Zahlungen entspricht dem Kapitalwert (Abbildung 3.9). Für den Betrachtungszeitpunkt ist i. d. R. der Entscheidungszeitpunkt (= Zeitpunkt heute) zu wählen.²²¹ Für Betrachtungen der Lebenszykluskosten wird alternativ der Zeitpunkt der Inbetriebnahme vorgeschlagen.²²² Der Entscheidungszeitpunkt und die Baufertigstellung wären identisch. Der Kapitalwert entspricht somit dem Gegenwarts- oder auch Barwert einer Investition. POGGENSEE definiert den Kapitalwert als „(...) Differenz der barwertigen Ein- und Auszahlungen eines Investitionsobjektes“.²²³ Dabei werden alle Einzahlungen als positiver, alle Auszahlungen als negativer Zahlenwert berücksichtigt.

Kapitalwert:

$$KW_0 = \sum_{t=0}^T (E_t + A_t) \cdot q^{-t} = \sum_{t=0}^T N_t \cdot q^{-t} \quad (3.1)$$

Dabei gilt:

- KW_0 = Kapitalwert zum Zeitpunkt t_0
- E_t = Einzahlungen zum Zeitpunkt t_n
- A_t = Auszahlungen zum Zeitpunkt t_n
- N_t = $(E_t - A_t)$ = Nettozahlung zum Zeitpunkt t_n
- q^{-t} = $(1 + i)^t$ Abzinsungsfaktor zum Zeitpunkt t_n
- i = Kalkulationszinssatz
- t = $t_n - t_0$ = Periode
- T = Zeitpunkt zu dem letzte Zahlungen anfallen

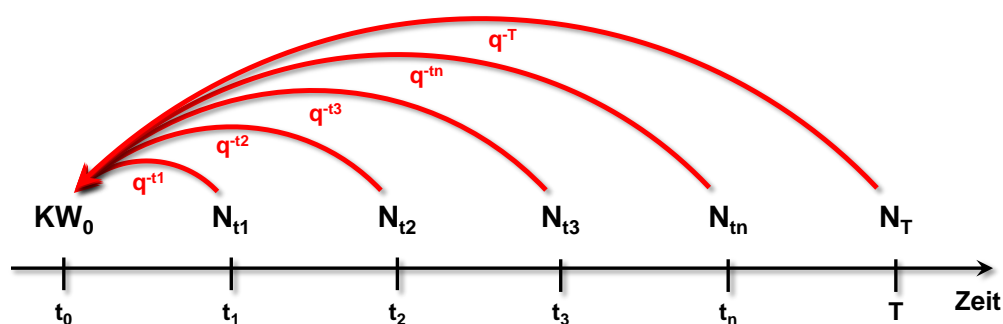


Abbildung 3.9: Abzinsung der einzelnen Nettozahlungen zur Bildung des Kapitalwertes KW_0

²²⁰ vgl. DÄUMLER, GRABE (2007), S. 48; GÖTZE (2008), S. 71; CARSTENSEN (2008), S. 34

²²¹ vgl. BMF (2011), S. 15

²²² vgl. GIRMSCHIED (2006), S. 398; VOGT (2012), S. 128 f.; VOGT, THEWES (2012)B

²²³ POGGENSEE (2011), S. 124

Als wesentliche Einflussgrößen für den Kapitalwert lassen sich folgende Kriterien identifizieren:

- Höhe der Zahlungen
- zeitlicher Anfall der Zahlungen
- Höhe des Kalkulationszinssatzes

Der ermittelte Kapitalwert ist Ausgangspunkt für die Bewertung der Vorteilhaftigkeit der zu untersuchenden Alternativen. Es werden zwei wesentliche Regeln unterschieden:

- Eine Investition ist **absolut vorteilhaft**, sofern der Kapitalwert größer als Null ist.
- Eine Investition ist **relativ vorteilhaft**, sofern der Kapitalwert größer ist, als der Kapitalwert sämtlicher Vergleichsalternativen.

Ist der ermittelte Kapitalwert gleich Null, so entspricht dieser dem Gegenwert einer Anlage finanzieller Mittel zum Kalkulationszinssatz.

Im Rahmen einer originären Lebenszykluskostenrechnung werden lediglich die anfallenden Auszahlungen (bzw. Kosten – entsprechend der Definition des Kostenbegriffs nach Abs. 3.1.3.1) betrachtet. Der ermittelte Kapitalwert wäre aus diesem Grund immer negativ. Gleiches gilt bei Investitionen ohne direkt zuordenbare Einzahlungen, wie z. B. bei Infrastrukturprojekten (keine Miet- bzw. direkte Mauteinnahmen). Eine absolute Vorteilhaftigkeit wäre bei solchen Projekten nicht zu erzielen. Im Rahmen einer Lebenszykluskostenrechnung ist dies auch nicht zwingend von Bedeutung. Das Hauptziel ist die ökonomisch vorteilhafteste Alternative zu identifizieren. Dafür ist lediglich auf die relative Vorteilhaftigkeit abzielen. Im Fall einer Lebenszykluskostenanalyse wäre die Ausführungsvariante mit dem betragsmäßig niedrigsten (negativen) Kapitalwert am wirtschaftlichsten.²²⁴

3.2 Risikoanalyse bei Lebenszykluskostenrechnungen

Eine Investition ist eine in die Zukunft gerichtete Handlung. Die Bewertung hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit beruht somit auf Planungsdaten, deren Größe und Eintreten prognostiziert werden muss.²²⁵ Bei den bisherigen Verfahren wurde vorausgesetzt, dass sämtliche Rechengrößen (Zahlungen, Anfallszeitpunkt und Zinssatz) als deterministische Größen vorliegen und in ihrer Ausprägung tatsächlich eintreten. Es wurde davon ausgegangen, dass die Ausgangsdaten mit Sicherheit vorhergesagt werden können. Diese Rechenverfahren werden deshalb als „Verfahren unter Sicherheit“ bezeichnet (Abbildung 3.7).²²⁶

In Wirklichkeit handelt es sich bei einer Investitionsrechnungen, ebenso wie bei einer Lebenszykluskostenrechnung, um eine modellhafte Abbildung zukünftiger Ereignisse und deren Konsequenzen. Die verwendeten Daten und der sich daraus ergebende Eintritt der angenommenen Umweltzustände kann also nicht mit Sicherheit vorausgesagt werden. Tatsächlich ist eine Prognose aufgrund der „Unvorhersehbarkeit der Zukunft“²²⁷ mit Unsicherheiten verbunden.²²⁸ Diese Unsicherheiten sind nicht vollständig zu eliminieren. Die

²²⁴ BMF (2011), S. 17

²²⁵ vgl. NÖLL, WIEDEMANN (2008), S. 39

²²⁶ vgl. GÖTZE (2008), S. 343; WÖHE (2000), S. 157; OTT (2011), S. 165

²²⁷ HOFFMEISTER (2008), S. 186

²²⁸ Bei einer Prognose werden aus vorliegenden (Quasi-) Gesetzmäßigkeiten (zukünftige) Konsequenzen abgeleitet.

vgl. FÜRNRÖHR (1992), S. 34 ff.

Auswirkungen möglicher Veränderungen lassen sich allerdings durch geeignete Mittel sichtbar machen. Anhand einer fundierten Ermittlung der erforderlichen Daten bzw. Informationen ist eine gezielte Reduzierung der Unsicherheiten im Entscheidungsprozess zu erreichen.²²⁹

3.2.1 Begriffe und Definitionen

Aufgrund unterschiedlicher, zum Teil auch nicht richtiger Anwendung einzelner Begrifflichkeiten der Risikoanalyse, werden diese zunächst eingehend erläutert und abgegrenzt.²³⁰

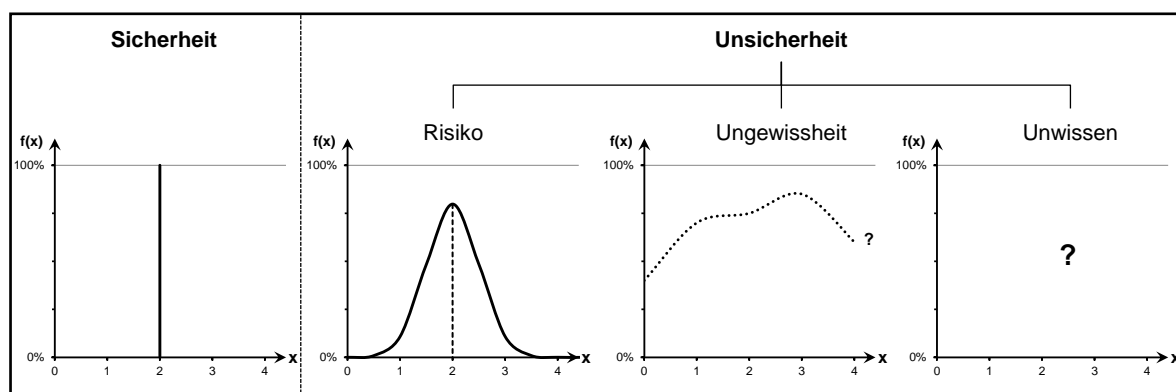


Abbildung 3.10: Differenzierung von Sicherheit, Risiko und Ungewissheit und Unwissen²³¹

Der Begriff „Unsicherheit“ bezieht sich auf eine unvollständige Daten- und Informationsgrundlage, die für eine Entscheidung einbezogen werden müssen.²³² Es wird dabei zwischen Risiko, Ungewissheit und Unwissen unterschieden (Abbildung 3.10).²³³

Risiko ist dadurch definiert, dass die möglichen Umweltzustände und die zugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeiten als bekannt vorauszusetzen sind.²³⁴

Ungewissheit liegt immer dann vor, wenn das Ereignis (Zahlungshöhe, Zeitpunkt, Zinshöhe) und dessen Auswirkungen bekannt sind, jedoch eine entsprechende Eintrittswahrscheinlichkeit nicht zugeordnet werden kann.²³⁵ SANDOVAL-WONG spricht ebenfalls von Ungewissheit, sofern die Wahrscheinlichkeit über den Ereigniseintritt bekannt, jedoch das Ausmaß der Auswirkungen nicht quantifizierbar ist.²³⁶ Hierfür verwendet er den Begriff „partielle Unsicherheit“.²³⁷

Liegen weder Kenntnisse über die Wahrscheinlichkeit des Eintretens vor, noch lassen sich Auswirkungen abschätzen, ist dies als **Unwissen** einzustufen.²³⁸

²²⁹ vgl. GROB (2006), S. 428; GÖTZE (2008), S. 344

²³⁰ vgl. GROB (2006), S. 429; WITTMANN (1993), S. 3813

²³¹ in Anlehnung an CANADA, WHITE (1980), S. 252

²³² vgl. WITTMANN (1993), S. 3814

²³³ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 9

²³⁴ vgl. POGGENSEE (2011), S. 298

²³⁵ vgl. GROB (2006), S. 431; GÖTZE (2008), S. 343

²³⁶ vgl. SANDOVAL-WONG (2012), S. 40 f.

²³⁷ „Partial Uncertainty“ [SANDOVAL-WONG (2012), S. 41]

²³⁸ vgl. ERMSCHEL, MÖBIUS, WENGERT (2013), S. 31

Ohne das Wissen über die Ausprägung etwaiger Umweltzustände bzw. deren Eintrittswahrscheinlichkeit ist eine Bestimmung möglicher Wertveränderungen grundsätzlich nicht möglich. Aus diesem Grund ist lediglich das Risiko (R) als Funktion aus (Schadens-) Auswirkung (A) und Eintrittswahrscheinlichkeit (W) mit dem Ergebnis einer quantitativ messbaren Größe zu beschreiben.²³⁹

$$R = A \cdot W \quad (3.2)$$

Dieser Umstand ist für eine Berücksichtigung in der Lebenszykluskostenrechnung zu beseitigen, zumal lediglich Risiken, nicht aber Unsicherheiten bzw. Unwissen quantitativ berücksichtigt werden können. Ein erster Ansatz wäre beispielsweise eine (subjektive) Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten oder von Schadensausmaßen unter Einbeziehung von Experten.

Abweichend vom allgemeinen Verständnis beinhalten Risiken neben der Gefahr von negativen Zielabweichungen auch die Chancen auf eine positive Zielveränderung.²⁴⁰ Unsicherheiten in der Datengrundlage können dazu führen, dass beispielsweise zum Entscheidungszeitpunkt unvorteilhafte Investitionen sich im Laufe des Projektfortschrittes zur vorteilhaftesten Variante entwickeln. Die vorher getroffene Entscheidung für die vermeintlich wirtschaftlichste Investition wäre somit als „nicht richtig“ einzustufen. Durch die Berücksichtigung von Risiken in der Investitionsrechnung kann diese Diskrepanz behoben werden.

3.2.2 Verfahren zur Berücksichtigung von Risiko

Spezielle Rechenverfahren bieten die Möglichkeit, die der Investitionsrechnung immanente Unsicherheit in den Entscheidungsprozess einzubeziehen. Dabei handelt es sich nicht um eigenständige Verfahren. Vielmehr stellen diese eine Erweiterung der dynamischen Rechenmodelle, im Besonderen der Kapitalwertmethode, dar.²⁴¹ Die für die Lebenszykluskostenrechnung wesentlichen Verfahren umfassen:²⁴²

- Korrekturverfahren
- Sensitivitätsanalysen
- Risikoanalysen

3.2.2.1 Korrekturverfahren

Im Korrekturverfahren findet die Unsicherheit über eine Veränderung der als „sicher“ angenommen Eingangswerte in Form von Risiko- bzw. -abschlägen Berücksichtigung. Die Anpassung kann sämtliche Elemente einer Investitionsrechnung (Zahlung, Zeitpunkt, Zinssatz) umfassen und durch relative oder absolute Zuschläge erfolgen. Die Korrektur der Ausgangswerte basiert dabei auf vorhandenen Zeitreihen ähnlicher Problemstellungen. In vielen Fällen erfolgt jedoch eine Anpassung auf subjektiver Grundlage.²⁴³

²³⁹ vgl. STEIGER (2009), S. 17

²⁴⁰ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 1; POGGENSEE (2011), S. 295

²⁴¹ siehe hierzu Abs. 3.1.5

Grundsätzlich sind diese Verfahren auch auf andere Verfahren der Investitionsrechnung, beispielsweise dem Vollständigen Finanzplan (VoFi) anwendbar.

²⁴² vgl. GÖTZE (2008), S. 352; GROB (2006), S. 434 ff.

²⁴³ vgl. GROB (2006), S. 427

Hauptkritikpunkt beim Korrekturverfahren ist, dass die Unsicherheiten in vielen Fällen nur „summarisch“ erfasst werden.²⁴⁴ Eine Differenzierung für die einzelnen Eingangsdaten kann dadurch nicht erfolgen. Diese Vereinfachung führt häufig dazu, dass auch Rechenelemente verändert werden, deren Unsicherheit zu vernachlässigen ist bzw. für die keine Unsicherheit vorliegt.²⁴⁵ Die fehlende analytische Bestimmung der Unsicherheit führt letztlich dazu, dass dieses Verfahren für einen Einsatz in wissenschaftlich fundierten Modellen wenig geeignet ist.

3.2.2.2 Sensitivitätsanalyse

Aufbauend auf einen mit deterministischen Werten ermittelten Kapitalwert, wird mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse untersucht, wie sensibel das Rechenergebnis auf Variation der eigentlich unsicheren Eingangsgrößen reagiert.²⁴⁶ Um Veränderungen im Ergebnis der entsprechenden Eingangsgröße zuordnen zu können, wird ausschließlich eine Inputgröße bzw. -gruppe variiert. Alle weiteren Rechengrößen bleiben gegenüber der Ausgangsrechnung unverändert.²⁴⁷ Dieses Vorgehen (*ceteris paribus*) ermöglicht eine Identifizierung der Eingangsgrößen, durch die der Zielwert besonders stark beeinflusst werden kann. Eine gezielte Informationsbeschaffung bezüglich dieser Daten führt letztlich zu einer Reduzierung des mit Unsicherheiten belegten Zielwertes.

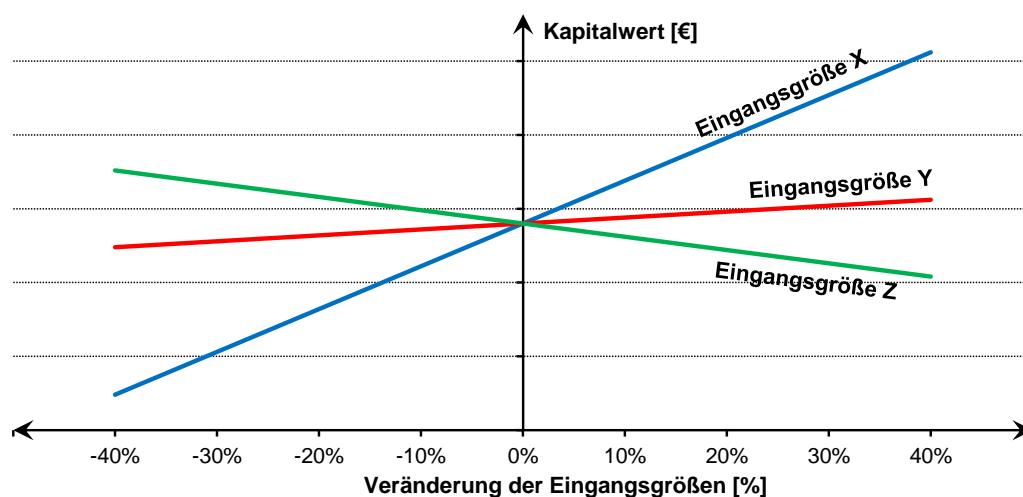


Abbildung 3.11: Darstellung der Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse

Das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse kann übersichtlich in Diagrammen visualisiert werden. Bei der in Abbildung 3.11 dargestellten Diagrammform ermöglichen die Steigungen der einzelnen Zielwertverläufe einen Rückschluss auf den Einfluss der jeweiligen Eingangsgröße. Je steiler der Verlauf des Graphen, desto größer ist die Sensitivität des Zielwertes.

Durch die Sensitivitätsanalyse und der dadurch bedingten Konzentration auf nur eine Einflussgröße kann ein Bezug zur Realität nur in Ausnahmefällen hergestellt werden. Der Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass die Zusammenhänge der Investitions- bzw. Lebenszykluskostenrechnung und die Auswirkungen möglicher Unsicherheiten für die Ver-

²⁴⁴ vgl. BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 229; HILDENBRAND (1988), S. 23

²⁴⁵ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 23

²⁴⁶ vgl. BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 230

²⁴⁷ vgl. SCHINDEL (1977), S. 26

antwortlichen erfassbar werden.²⁴⁸ Es gilt jedoch zu beachten, dass die Sensitivitätsanalyse selbst nicht zu einer gesicherteren Zielwertbestimmung führt. Vielmehr können die vorhandenen Unsicherheiten letztlich nur dadurch reduziert werden, dass die Datengrundlage und damit die Prognose der (wesentlichen) Eingangsdaten verbessert wird.

Die Sensitivitätsanalyse kann darüber hinaus dazu verwendet werden, kritische Grenzwerte von Rechengrößen zu ermitteln, so dass der Zielwert (z. B. Kapitalwert) eine vorgegebene Größe nicht über- bzw. unterschreitet.²⁴⁹ Hierfür finden sich in der Literatur Begriffe wie „Verfahren der kritischen Werte“²⁵⁰ oder „Kritische Werte-Rechnung“²⁵¹.

Für die weitere Ausarbeitung ist die Sensitivitätsanalyse, die zur Identifikation und Bewertung von Einflussgrößen für die Lebenszykluskostenrechnung dienen kann, in die Methodik zur Optimierung der Lebenszykluskosten zu integrieren.

3.2.2.3 Risikoanalyse

Bei einer Risikoanalyse erfolgt die Bestimmung des Zielwertes durch kombinierte Veränderung der unsicheren Eingangsgrößen.²⁵² Das Ergebnis stellt nicht einen Einzelwert, sondern eine Streubreite aller möglichen Zielwerte in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung dar.²⁵³ Als Ausgangsgrößen sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der „unsicheren“ Werte sowie die funktionellen Abhängigkeiten der einzelnen Parameter untereinander zu bestimmen.²⁵⁴ Dies kann über die Auswertung von Zeitreihen bestehender, vergleichbarer Projekte oder durch Vorgabe des Verteilungstyps sowie Abschätzung der relevanten Parameter (Erwartungswert, Standardabweichung usw.) erfolgen.²⁵⁵

Durch die Möglichkeit zur Darstellung der der Lebenszykluskostenanalyse immanenten Risiken (mit Erwartungswert, Streubreite usw.) zeigt sich die Risikoanalyse als geeignetes Verfahren zur Einbindung in die Lebenszykluskostenrechnung. Insbesondere das Kriterium der Transparenz ist damit umsetzbar.

Für die Risikoanalyse, die nachfolgend näher betrachtet werden soll, ist folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:²⁵⁶

- Bestimmung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die risikobehafteten Eingangsgrößen.
- Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Eingangsgrößen.
- Berechnung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße mit Hilfe der Eingangsgrößen durch Risikoaggregation.
- Bewertung der Ergebnisse der Risikoanalyse.

Zur Bestimmung des Einflusses einzelner Eingangsgrößen bietet sich die Sensitivitätsanalyse als ergänzende Betrachtung an.²⁵⁷

²⁴⁸ vgl. BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 235

²⁴⁹ vgl. GÖTZE (2008), S. 364

²⁵⁰ vgl. BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 230

²⁵¹ POGGENSEE (2011), S. 305

²⁵² vgl. WÖHE (2000), S. 662

²⁵³ vgl. SCHINDEL (1977), S. 30

²⁵⁴ vgl. OTT (2011), S. 180

²⁵⁵ vgl. BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 206

²⁵⁶ in Anlehnung an SCHINDEL (1977), S. 31

²⁵⁷ vgl. GÖTZE (2008), S. 383

3.2.3 Beschreibung von Risiken durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Eine Berücksichtigung von Risiken in der Lebenszykluskostenrechnung kann nur erfolgen, sofern Informationen über deren Eintrittswahrscheinlichkeiten vorliegen. Zur Beschreibung der Risiken der Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerkes bzw. einzelner Bestandteile ist deshalb auf die Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie zurückzugegriffen.

Bei einer Risikoanalyse werden die Eingangsgrößen und deren Zufallsvariablen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben.²⁵⁸ Eine Zufallsvariable entspricht einer Funktion, durch die jedem Elementarereignis ω eine reelle Zahl X aus der Ergebnismenge Ω zugeordnet werden kann. Dabei ist zwischen diskreten und stetigen Zufallsvariablen zu unterscheiden. Eine diskrete Zufallsvariable kann nur endlich viele bzw. unendlich viele abzählbare Ausprägungen annehmen. Der Ergebnisraum einer stetigen Zufallsvariable umfasst jeden beliebigen reellen Wert aus einem endlichen bzw. unendlichen Intervall. Die bei Durchführung des Zufallsexperimentes ermittelten Werte, die eine Zufallsvariable annimmt, werden als Realisationen (oder auch Ausprägungen) der Zufallsvariablen bezeichnet.²⁵⁹

Durch die Wahrscheinlichkeitsfunktion bzw. -verteilung wird vorgegeben, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Zufallsvariable eine bestimmte Ausprägung annimmt.²⁶⁰ Die zugrundeliegenden Verteilungen einer Zufallsvariable können sowohl auf objektiven als auch auf subjektiven Wahrscheinlichkeiten der Eingangsparameter beruhen.

Beim Vorhandensein von mathematisch-statistisch ermittelten Wahrscheinlichkeiten handelt es sich um objektive Wahrscheinlichkeiten. Diese beruhen auf statistischen Daten, die aus zurückliegenden Zeiträumen mit Hilfe von stochastischen Auswertungen ermittelt oder aus mathematischen Zusammenhängen bestimmt wurden. Die hieraus abgeleiteten Verteilungsfunktionen dienen zur Abschätzung zukünftiger Ereignisse.²⁶¹

Liegen keine konkreten Daten bzw. Zeitreihen zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeiten vor, sind diese auf Erfahrungen zu begründen bzw. durch Experten abzuschätzen. Durch die fehlende Datengrundlage handelt es sich hierbei um subjektive Abschätzungen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen.²⁶²

Durch Anwendung der Risikoanalyse lassen sich Erkenntnisse über das Wahrscheinlichkeitsverhalten der Lebenszykluskosten (bzw. des Kapitalwertes) ableiten.²⁶³ Besonders die sich daraus ergebenden Risikomaße (Erwartungswert, Streubreite und Standardabweichung) sind für die Entscheidungsfindung wichtige zu ermittelnde Parameter.²⁶⁴

Die für eine Lebenszykluskostenrechnung relevanten diskreten und stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden in Anhang A.1 – Abs. A.1.2 eingehend beschrieben und dabei mögliche Anwendungsspektren aufgezeigt.

²⁵⁸ vgl. FINKE (2005), S. 45

²⁵⁹ vgl. PAPULA (2011), S. 317

²⁶⁰ vgl. FINKE (2005), S. 48

²⁶¹ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 39

²⁶² vgl. MAIER (2007), S. 6 f.

²⁶³ vgl. JÖCKEL, PFLAUMER (1981), S. 40

²⁶⁴ siehe hierzu Abs. 3.2.6 bzw. Anhang A.1 – Abs. A.1.4

3.2.4 Korrelation von Zufallsvariablen

Die Eingangsparameter einer Risikoanalyse und ihre unsicheren Ausprägungen können gegenseitigen Abhängigkeiten unterliegen. So führt beispielsweise eine häufigere Reinigung des Tunnels (Reinigungskosten) zu einer Reduzierung der Energiekosten für die Beleuchtung.²⁶⁵ In einer Risikoanalyse sind entsprechende Abhängigkeiten zu berücksichtigen.²⁶⁶ Die Zusammenhänge zwischen mehreren Risiken können mit Hilfe spezieller Abhängigkeitsmaßzahlen (Korrelationskoeffizienten) dargestellt und in der Risikoallokation berücksichtigt werden. Dazu notwendig sind sogenannte Korrelationsanalysen, mit denen statistische Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen bestimmt werden.²⁶⁷

Sofern keine ausreichende statistische Grundlage gegeben ist, sind vorhandene Korrelationen durch (subjektive) Abschätzungen der Abhängigkeiten zu bestimmen.²⁶⁸

3.2.5 Methoden zur Risikoaggregation

Zur Bestimmung der Zielwertverteilung bei einer Risikoanalyse kann auf drei unterschiedliche Lösungsansätze zurückgegriffen werden.²⁶⁹

- Analytisches Verfahren
- Vollenumeration
- Simulation

Bei **Analytischen Verfahren** wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße mit Hilfe von mathematischen Rechenverfahren (z. B. Faltung von Zufallsgrößen) bestimmt. Hierfür gibt es nur bei einfachen Ausgangssituationen geschlossene Lösungsansätze, die eine Bestimmung der gesuchten Größe ermöglichen. Die Berechnungen basieren dabei auf dem Grenzwertsatz der Statistik.²⁷⁰ Komplexe Sachverhalte und Abhängigkeiten lassen sich nicht bzw. nur durch aufwendige mathematische Analysen abbilden.²⁷¹ Die Anwendung beschränkt sich deshalb auf einfache Aufgaben mit einer geringen Anzahl an Eingangsgrößen.²⁷² Für eine Lebenszykluskostenanalyse, die Tunnelbauwerke mit ihrer Komplexität möglichst realitätsnah abbilden soll, sind solche Verfahren nicht geeignet.

Die **Vollenumeration** wird den heuristischen Verfahren zugeordnet. Durch Berechnung der Zielwerte aller möglichen Kombinationen der Eingangsgrößen wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße bestimmt.²⁷³ Der Umfang der durchzuführenden Berechnungen resultiert aus der Anzahl der Eingangsgrößen und deren Wertebereiche. Die Anwendung eignet sich deshalb lediglich für Sachverhalte mit einer geringen Anzahl an Rechengrößen bzw. Parameter mit diskreter Verteilung.²⁷⁴

²⁶⁵ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 251

²⁶⁶ vgl. GÖTZE (2008), S. 377; SCHINDEL (1977), S. 30 ff.

²⁶⁷ vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 92

Eine erste Einführung in das Thema Korrelation erfolgt in Anhang A.1 – Abs. A.1.3.

²⁶⁸ vgl. BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 247

²⁶⁹ vgl. SCHINDEL (1977), S. 33 bzw. S. 37

²⁷⁰ vgl. POGGENSEE (2011), S. 344

²⁷¹ vgl. GLEISSNER (2008), S. 144

²⁷² vgl. SCHINDEL (1977), S. 33

²⁷³ vgl. SCHINDEL (1977), S. 37; WÖHE (2000), S. 662

²⁷⁴ vgl. POGGENSEE (2011), S. 344; SCHINDEL (1977), S. 38

Wie die Vollerumeration, zählt auch die **Simulation** zu den heuristischen Verfahren. Dies bedeutet, dass einzelne Kombinationen aus den Eingangsgrößen vollständig berechnet werden. Anders als bei der Vollerumeration umfasst der Rechenumfang jedoch nur eine Stichprobenauswahl aus zufällig ausgewählten Kombinationen der Eingangsgrößenverteilungen. Der Rechenumfang ist entsprechend geringer. Die Bestimmung der Zufallszahlen erfolgt beispielsweise über die Monte-Carlo-Technik oder die Random-Set-Methode. Aus jedem Rechenlauf – mit den entsprechenden Zufallszahlen – ergibt sich exakt eine Lösung für den Zielwert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße lässt sich aus der Summe der einzelnen Rechenläufe und der zugehörigen Verteilung der Ergebnisse ableiten. Dazu sind die Wechselbeziehungen der einzelnen Eingangsparameter in Form von Abhängigkeiten (Korrelationen) zu berücksichtigen.²⁷⁵ Die Anzahl der erforderlichen Rechengänge ist dabei so zu wählen, dass die Gesamtheit der zufälligen Stichproben repräsentativ ist und eine ausreichend stabile Verteilung der gesuchten Größe vorliegt.²⁷⁶ Der reduzierte Rechenaufwand sowie die Entwicklung softwarebasierender Lösungen ermöglichen eine Untersuchung auch großer, komplexer Systeme. Die Simulation bildet somit eine geeignete Basis zur Einbindung von Unsicherheiten in das zu entwickelnde Lebenszykluskostenmodell.

Weitere Ausführungen zur Durchführung einer Risikoanalyse mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation sind unter Abs. 3.3 angeführt.

3.2.6 Bewertung der Ergebnisse einer Risikoanalyse

Unabhängig vom gewählten Verfahren handelt es sich beim Ergebnis einer Risikoanalyse nicht um einen eindeutigen Zielwert. Vielmehr wird die Eintrittswahrscheinlichkeit der möglichen Ergebnisse als Verteilungsfunktion dargestellt. Eine Bewertung bzw. ein Vergleich von wahrscheinlichkeitsbasierenden Berechnungsergebnissen kann grundsätzlich nur bei Kenntnis der jeweils vollständigen Wahrscheinlichkeitsverteilung erfolgen.²⁷⁷ Hierfür sind allerdings vertiefte Kenntnisse bezüglich der Interpretation der Verteilungsfunktionen erforderlich.

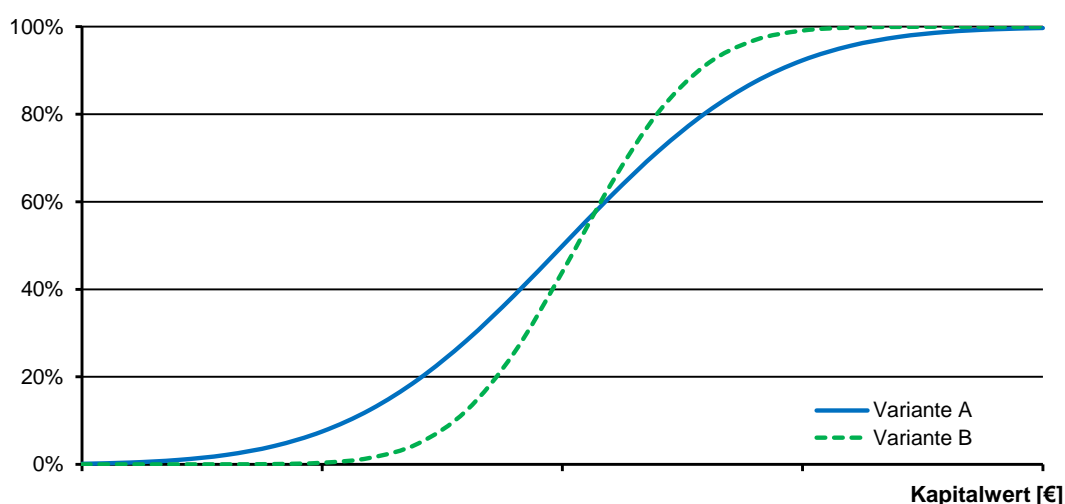


Abbildung 3.12: Verteilungsfunktionen des Kapitalwertes von zwei Investitionsalternativen

²⁷⁵ vgl. GÖTZE (2008), S. 377; SCHINDEL (1977), S. 31

²⁷⁶ vgl. GÖTZE (2008), S. 377; BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012), S. 250

²⁷⁷ vgl. COTTIN (2013), S. 110

Die Ausprägung der Verteilung kann in Form einer graphischen Verteilungsfunktion (Abbildung 3.12) oder gleichwertig mit Hilfe der Momente (Parameter), sogenannte Risikomaße, charakterisiert und mit anderen Zielgrößenausprägungen verglichen werden.²⁷⁸ Die wesentlichen Risikomaße zur Beschreibung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen umfassen:²⁷⁹

- Erwartungswert $E(X) = \mu_x$
- Median $M(X)$
- Modus $\text{Mod}(X)$
- Varianz $\text{Var} = \sigma^2$
- Standardabweichung σ
- Schiefe $\gamma_1(x)$
- Quantil (x_p)

Wie Abbildung 3.12 zu entnehmen, ist eine eindeutige Zuweisung der Vorteilhaftigkeit einer Investitionsalternative nicht direkt möglich. Die ermittelten Zielwertverteilungen bedürfen hinsichtlich ihrer Ergebnisse einer zusätzlichen Interpretation und Bewertung durch den Entscheidungsträger. Dabei ist auch dessen Risikoeinstellung (risikoavers, risikoneutral oder risikoaffin) in die Entscheidungsfindung mit einzubeziehen.²⁸⁰ Zudem ist die zur Verfügung stehende Datenqualität ebenfalls im Entscheidungsprozess zu berücksichtigen.

3.2.7 Datengrundlage für die Risikoanalyse

Bei der Berechnung der Lebenszykluskosten handelt es sich um eine Prognose der zu erwartenden Kosten.²⁸¹ Wie bei der deterministischen Berechnungsmethodik, hängt die Prognosequalität des Zielwertes ganz wesentlich von der Qualität der zur Verfügung stehenden Daten ab. Für die Risikoanalyse ist im Besonderen die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeiten und der stochastischen Abhängigkeiten von Bedeutung.²⁸² Dabei sind neben der Datenerhebung weiterführende Untersuchungen vorzunehmen, um Abhängigkeiten der einzelnen Parameter zu ermitteln (z. B. durch Korrelationsanalyse) und in der Risikoanalyse wirklichkeitsnah zu berücksichtigen. Für die Bestimmung der notwendigen Daten kann, abhängig von der vorliegenden Datengrundlage, auf unterschiedliche Methoden zurückgegriffen werden. Es ist dabei zwischen objektiven (z. B. stochastische Datenauswertung) bzw. subjektiven Ansätzen (z. B. Expertenbefragung, Delphi-Methode) zu unterscheiden.²⁸³

²⁷⁸ vgl. GLEISSNER (2008), S. 110; PAPULA (2010), S. 335

²⁷⁹ Erläuterung der einzelnen Parameter sind Anhang A.1 – Abs. A.1.4 zu entnehmen.

²⁸⁰ Von risikoaffin ist auszugehen, wenn der Entscheidungsträger, die im vorliegenden Risiko enthaltenen Chancen höher bewertet, als die Gefahren.

Bei Risikoneutralität werden – bei sonst gleichen Zielgrößen – die Risiken in der Entscheidungsfindung nahezu vollständig ausgeblendet.

Risikoavers bedeutet, dass den möglichen Gefahren ein deutlich größeres Gewicht eingeräumt wird, als den möglichen Chancen.

vgl. MAIER (2007), S. 17; PINDYCK, RUBINFELD (2009), S. 227 f.

²⁸¹ vgl. DIN EN 60300-3-3 (2005), S. 20

²⁸² vgl. GÖTZE (2008), S. 382

²⁸³ Die einzelnen Methoden zur Datenerhebung werden in Anhang A.1 – Abs. A.1.5 eingehend erläutert.

Eine ausreichende Datengrundlage, die eine Anwendung der in Anhang A.1 – Abs. 1.5 vorgestellten Methoden zur Datenerhebung (Stochastische Datenauswertung, Expertenbefragung, Delphi-Methode) in dieser Arbeit begründen, liegen bislang nicht vor. Das zu entwickelnde Modell sowie die zugehörige Methodik sind allerdings so auszugestalten, dass eine zukünftige Integration möglich ist. Weiterführende Ausführungen für später zur Verfügung stehende Daten sind der einschlägigen Literatur der induktiven Statistik zu entnehmen.²⁸⁴

3.3 Monte-Carlo-Simulation

Zur Durchführung einer Risikoanalyse kann bei komplexen Systemen, wie bereits unter Abs. 3.2.5 kurz erläutert, nicht mehr auf analytische Rechenverfahren zurückgegriffen werden.²⁸⁵ Stattdessen kommen numerische Simulationsverfahren, wie z. B. die Monte-Carlo-Simulation (MCS), zum Einsatz. Bei der MCS handelt es sich um ein numerisches, stichprobentheoretisches Verfahren zur Lösung mathematischer Problemstellungen.²⁸⁶ Im Allgemeinen werden unter dem Begriff „Monte-Carlo-Simulation“ verschiedenste Simulationsverfahren zusammengefasst, bei denen zur Zielgrößenbestimmung Zufallszahlen zum Einsatz kommen.²⁸⁷ Durch das mehrmalige Ziehen von Zufallszahlen werden zufällige Stichproben bestimmt, die zur Ermittlung einer Näherungslösung dienen. Die bestehenden Einzelrisiken werden so zu einem Gesamtrisiko zusammengeführt.²⁸⁸

3.3.1 Einführung

Der Ursprung der Monte-Carlo-Simulation, oder auch Monte-Carlo-Methode, ist auf die Mathematiker J. VON NEUMANN und S. ULAM, in Zusammenhang mit der Entwicklung der Atombombe während des zweiten Weltkrieges, zurückzuführen. Die theoretischen Grundlagen sind bereits seit dem 18. Jahrhundert bekannt, beispielsweise zur Ermittlung der Zahl π durch LECLERC.²⁸⁹ Aufgrund der notwendigen Bestimmung von Zufallszahlen findet die Monte-Carlo-Simulation erst mit Einführung leistungsfähiger Rechner breite Anwendung. Zuvor musste auf mechanische Generatoren, wie sie z. B. beim Roulett Verwendung finden, zurückgegriffen werden. Von den in Spielcasinos in Monte-Carlo aufgestellten Spieltischen rührt vermutlich auch die Namensgebung.²⁹⁰ Seit den 1960er Jahren findet das bis dato fast ausschließlich für mathematische und physikalische Problemstellungen angewandte Rechenverfahren Einzug in die Risikoanalyse und -bewertung.²⁹¹ Eine Adaption auf die Lebenszykluskostenrechnung, als vergleichsweises neues Themengebiet der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung, wurde erst in den letzten Jahren, beispielsweise durch Modelle von GIRMSCHIED²⁹², BOUSSABAIN & KIRKHAM²⁹³ oder auch WANG, CHANG & EL-SHEIKH²⁹⁴ verstärkt vorangetrieben.

²⁸⁴ beispielsweise AUER, ROTTMANN (2010); BOURIER (2011); GEORGII (2008); STELAND (2013)

²⁸⁵ vgl. METROPOLIS, ULAM (1949), S. 336

²⁸⁶ vgl. HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 11; HILDENBRAND (1988), S. 47; SCHNEEWEISS (1969), S. 129

²⁸⁷ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 405

²⁸⁸ vgl. FISHMAN (1996), S. 1; STEIGER (2009), S. 70; WEIG (2008), S. 109

²⁸⁹ vgl. HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 17; SOBOL (1991), S. 12

²⁹⁰ vgl. HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 17

²⁹¹ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 48

²⁹² vgl. GIRMSCHIED (2006)

²⁹³ vgl. BOUSSABAIN, KIRKHAM (2006)

²⁹⁴ vgl. WANG, CHANG, EL-SHEIKH (2012)

Der Einsatzbereich der Monte-Carlo-Simulation umfasst sowohl deterministische als auch stochastische Problemstellungen. Beim Einsatz zur Lösung von deterministischen Aufgabenstellungen, wie z. B. der Bestimmung der Zahl π oder der Lösung von linearen Gleichungssystemen, sind diese in ein künstliches wahrscheinlichkeitstheoretisches Modell zu überführen. Bei stochastischen Fragestellungen, z. B. zur Risikobewertung, sind die in die Modelle eingehenden Parameter in probabilistischer Form aufzubereiten.²⁹⁵ Grundlage können dabei sowohl sichere (deterministische) als auch unsichere (stochastische) Eingangsgrößen sein.²⁹⁶

Gegenüber wahrscheinlichkeitstheoretischen (analytischen) Verfahren besteht der Vorteil, dass auf bereits vorhandene deterministische Modelle zurückgegriffen werden kann. Eine Anpassung dieser Modelle ist dabei nicht erforderlich, so dass auch das Verständnis für die Zusammenhänge aus der deterministischen Berechnung abgeleitet werden kann.

3.3.2 Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation

Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation lässt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und die zugehörigen statistischen Kenngrößen (Momente) einer oder mehrerer, vorher definierter Zielgrößen bestimmen (Abbildung 3.13). Das zugehörige Modell umfasst mindestens eine stochastische Eingangsgröße, evtl. zusätzliche deterministischen Variablen sowie eine Funktion zur Bestimmung des gesuchten Zielwertes. Durch dieses mathematische Modell werden Eingangs- und Zielgröße verknüpft.²⁹⁷ Die stochastischen Eingangsgrößen (Zufallsvariablen) sind im Vorfeld mit Hilfe von diskreten bzw. stetigen Verteilungsfunktionen zu beschreiben.²⁹⁸ Für die mathematische Verknüpfung kann auf deterministische Modelle zurückgegriffen werden, zumal die mehrfache Durchführung der einzelnen Rechenschritte mit den jeweiligen Stichproben deterministisch erfolgt (Abbildung 3.13).²⁹⁹

Aus den Verteilungen der unsicheren Eingangsgrößen werden mit Hilfe von generierten Zufallszahlen und unter Beachtung möglicher Korrelationen, die zugehörigen Stichprobenwerte bestimmt.³⁰⁰ Mit den ermittelten Einzelwerten erfolgt auf Basis des Modells eine deterministische Berechnung der Zielgröße. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden zwischengespeichert. Dieser rechentechnische Vorgang wird so lange schrittweise wiederholt, bis eine ausreichende Stabilität der Zielgröße erreicht wurde, um auf die Grundgesamtheit schließen zu können.³⁰¹ Für jeden neuen Berechnungsdurchlauf sind dabei neue, unabhängige Zufallszahlen und daraus folgende Stichprobenwerte der einzelnen stochastischen Eingangsgrößen zu bilden. Jeder Simulationslauf entspricht letztlich einer Kombination von völlig zufälligen, unabhängigen Ereignissen (Szenarien).³⁰²

Mit Hilfe der gespeicherten Ergebnisse aus den einzelnen Rechenläufen werden die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße in Form eines Histogrammes bzw. einer Verteilungsfunktion sowie die zugehörigen stochastischen Parameter (Mittelwert, Varianz

²⁹⁵ vgl. HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 12; SOBOL (1991), S. 12

²⁹⁶ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 49

²⁹⁷ vgl. WEIG (2008), S. 109

²⁹⁸ vgl. FINK (2005), S. 103

²⁹⁹ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 49

³⁰⁰ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 48 f.; SCHNEEWEISS (1969), S. 144

Die für die Generierung von Stichproben notwendige Bestimmung von Zufallszahlen ist das Kernelement der Monte-Carlo-Simulation und wird in Anhang A.1 – Abs. A.1.6 näher erläutert.

³⁰¹ vgl. GLEISSNER (2008), S. 144; HILL (2012), S. 98

³⁰² vgl. RAUH, BERENZ, HEISSENHUBER (2007), S. 5

usw.) bestimmt.³⁰³ Ausgehend vom zentralen Grenzwertsatz der Stochastik ist darauf zu schließen, dass sich bei einer entsprechend großen Anzahl an probabilistischen Eingangsgrößen (unabhängig von deren Verteilungstypen), die Verteilungsfunktion der Zielgröße einer Normal- bzw. einer Log-Normalverteilung annähert.³⁰⁴ Grundsätzlich gilt es dabei zu beachten, dass es sich bei der ermittelten Zielgröße um eine Näherungslösung handelt, da das Ergebnis lediglich aus einer Stichprobe mit begrenztem Umfang bestimmt wurde.

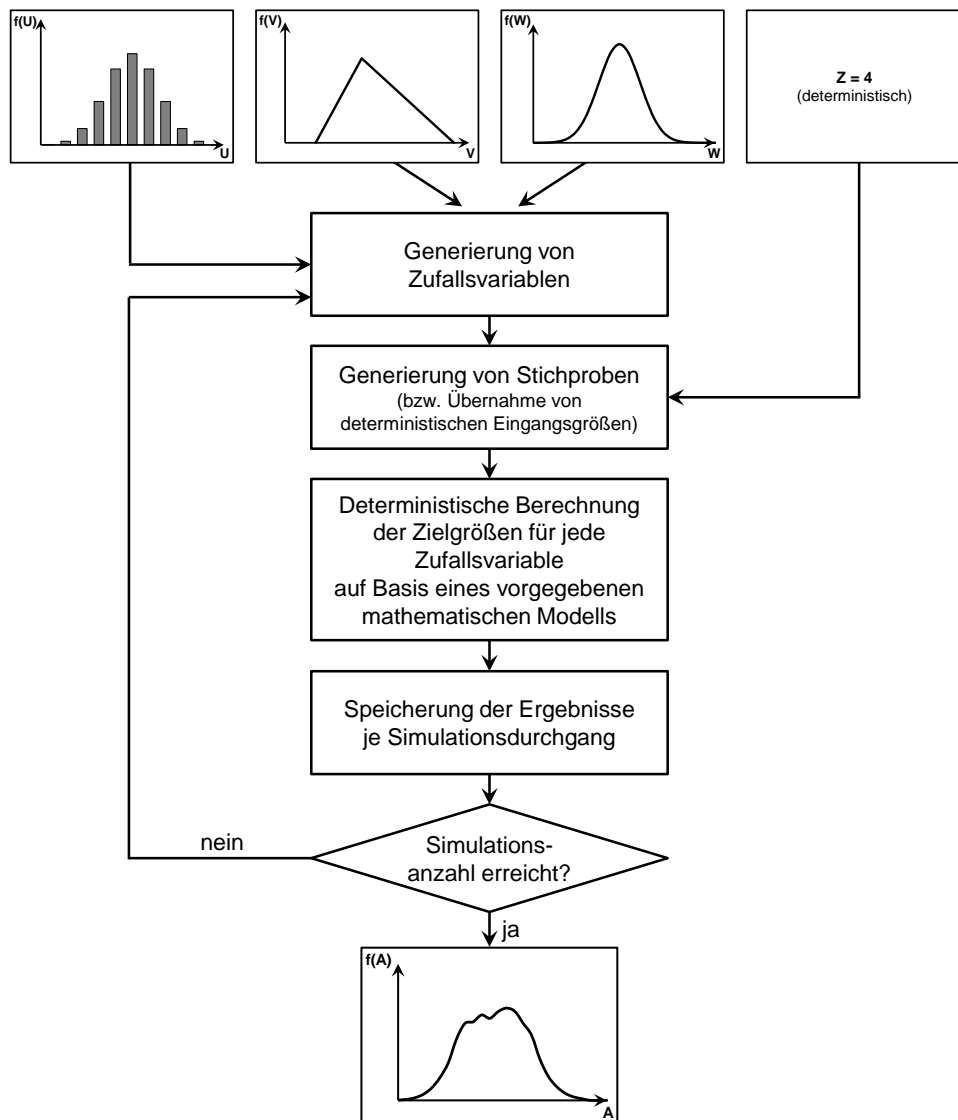


Abbildung 3.13: Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation³⁰⁵

³⁰³ vgl. WIEDENMANN (2005), S. 134

³⁰⁴ vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 89; CZADO, SCHMIDT (2011), S. 24 ff.; PAPULA (2011), S. 436 f.

³⁰⁵ in Anlehnung an HENKING (1998), S. 17; HILDENBRAND (1988), S. 49; ZACHER (2010), S. 79

3.4 Zusammenfassung der Grundlagen zur Lebenszykluskostenrechnung

Aus den in den vorangegangenen Abschnitt aufbereiteten Grundlagen zur Lebenszykluskostenrechnung konnten Ansätze identifiziert werden, die es zur Umsetzung der Forschungsfrage und der vorgegebenen Kriterien aufzugreifen gilt.

Zur Abbildung des Lebenszyklus von Tunnelbauwerken wird für das Modell auf das in Abs. 3.1.2 – Abbildung 3.3 abgeleitete 3-Phasen-Modell mit Herstellungs-, Nutzungs- und Verwertungsphase abgestellt. Insbesondere vor der Tatsache, dass eine weiterführende, eindeutige zeitliche Abgrenzung (z. B. von Planung und Umsetzung) nicht gegeben ist, ist eine detailliertere Untergliederung nicht zielführend. Vielmehr hat eine vertiefte Ausgestaltung bauteil- und projektbezogen mit Hilfe von Prozessen zu erfolgen.

Die Lebenszykluskosten entsprechen der Summe der anfallenden Kosten (gem. der in Abs. 3.1.3.1 vorgenommenen Definition) aller Lebensphasen (Abs. 3.1.3.2). Dabei gilt es grundsätzlich zu beachten, dass Erlöse (bzw. Einnahmen) methodisch dadurch einzubeziehen wären, dass die jeweiligen monetären Größen vorzeichenrichtig Berücksichtigung finden. Der Betrachtungsrahmen wird allerdings – in Übereinstimmung mit ISO/FDIS 15686-5 – hinsichtlich der Lebenszykluskosten auf die Erfassung und Optimierung der originären Kosten abgegrenzt. Eine Erweiterung, wie dies in verschiedenen Modellen bereits vorgenommen wurde, soll im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Allerdings ist die Möglichkeit zur Einbindung weiterführender Kriterien bereits zu schaffen.

Die Einbeziehung der Kosten aus allen Lebensphasen bedingt die Anwendung von Berechnungsverfahren der dynamischen Investitionsrechnung zur Bestimmung der Lebenszykluskosten (Abs. 3.1.5). Hierfür wird auf das von normativer Seite vorgeschlagene Verfahren der Kapitalwertmethode zurückgegriffen.³⁰⁶ Dabei sind das Modell und die zu entwickelnde Methodik zur Optimierung der Lebenszykluskosten in der Form auszugestalten, dass zukünftig alternative Verfahren der Investitionsrechnung ohne Anpassungen implementiert werden können.

Zur Einbindung von Unsicherheiten in die Bestimmung der Lebenszykluskosten ist eine Risikoanalyse zu integrieren. Dabei ist zur Identifikation der wesentlichen risikobehafteten Größen im Vorfeld auf Sensitivitätsanalysen zurückzugreifen (Abs. 3.2.2.2). Hinsichtlich der Aggregation der Risiken hat sich gezeigt, dass aufgrund der Komplexität der Kosten von Tunnelbauwerken, die Einbindung eines Simulationsverfahrens notwendig ist (Abs. 3.2.2). Hierzu erfolgt ein Rückgriff auf die Monte-Carlo-Simulation vor dem Hintergrund, dass für dessen Implementierung keine Anpassung des deterministischen Modells erfolgen muss (Abs. 3.3). Zusätzlich können sowohl deterministische als auch probabilistische Größen in die Berechnung einbezogen werden. Das Lebenszykluskostenmodell kann letztlich durch eine einfache Erweiterung für beide Formen Anwendung finden.

Zur fortwährenden Generierung von Optimierungsansätzen ist die Lebenszykluskostenrechnung nur bedingt geeignet. Ihr Anwendungsspektrum konzentriert sich auf die Entscheidungsfindung im Rahmen von größeren Investitionen (Neubau, Instandsetzung usw.). Für die Implementierung einer kontinuierlichen Optimierung der Kosten sind deshalb weitere Grundlagen zu schaffen. Hierfür wird in Abs. 4 das Benchmarking als Lösungsansatz vorgeschlagen, wobei die Lebenszykluskostenrechnung zur Prüfung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit von Optimierungsansätzen weiterhin heranzuziehen ist.

³⁰⁶ vgl. ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 26; DIN EN 60300-3-3 (2005), S. 27; BMV (2011), S. 15

4 Grundlagen des Benchmarking

Für die angestrebte kontinuierliche Optimierung von Prozessen, Kosten usw. wird auf das bekannte Managementinstrument „Benchmarking“ zurückgegriffen. Der Vorteil gegenüber anderen Ansätzen ist, dass der Fokus nicht primär auf die Kosten sondern auf die hinter den Kosten stehenden Leistungen und Prozesse gerichtet wird. Durch eine Gegenüberstellung des Untersuchungsgegenstandes mit identischen oder auch fremdartigen, aber vergleichbaren Prozessen oder Kennzahlen, lassen sich hieraus Substitutions- und Optimierungspotentiale identifizieren und gezielt umzusetzen. Der Anwender ist gezwungen sich mit den internen, aber auch mit den zu vergleichenden Prozessen dezidiert auseinanderzusetzen. Benchmarking schafft dadurch die notwendige Transparenz hinsichtlich der laufenden Kosten sowie der die Kosten verursachenden Parameter.³⁰⁷ Insbesondere für Tunnelbauwerke, wo bislang vorhandenes Knowhow zumeist in den einzelnen Fachsparten verstreut vorliegt, ist eine solche übergeordnete Zusammenführung zur Optimierung der Bauwerke und der daraus resultierenden Kosten unerlässlich.

4.1 Begriff, Definition und Historie

Der Begriff „Benchmarking“ stammt aus dem englischen Sprachraum und leitet sich aus dem Wort „benchmark“ ab. Als Benchmark wird dabei ein Bezugs- bzw. Höhenfestpunkt für die geodätische Vermessung bezeichnet. Daraus folgend bedeutet „Benchmarking“, bzw. grammatikalisch korrekt „to set a benchmark“, einen Bezugspunkt bzw. Maßstab setzen.³⁰⁸

In der Betriebswirtschaft wurde diese Grundbedeutung aufgegriffen und auf die Unternehmensführung als Managementinstrument übertragen. Dabei liegt eine Vielzahl an Definitionen vor, die alle auf die von KEARNS getätigte Definition zurückzuführen sind:

„Benchmarking ist ein kontinuierlicher Prozess, Produkte, Dienstleistungen und Praktiken zu messen gegen den stärksten Mitbewerber oder die Firma, die als Industrieführer angesehen werden.“³⁰⁹

Benchmarking ist demnach ein kontinuierlicher, systematischer Prozess zum zyklischen Vergleich von Prozessen, Leistungen usw. Der Vergleich orientiert sich am jeweiligen „Benchmark“ bzw. „Klassenprimus“ und verfolgt den aus dem TOYOTA-Prinzip³¹⁰ bekannten Zielgedanken einer systematischen Verbesserung durch Vergleichen mit bzw. Lernen von den besten Lösungen.³¹¹ Wesentlich dabei ist die Kontinuität. Das heißt, dass der Vergleich und die Zielsetzung kein einmaliges Unterfangen sind Verbesserungen umzusetzen, sondern vielmehr eine dauerhafte, wiederkehrende Tätigkeit darstellen soll.³¹² Wichtigste Orientierung bietet hierfür die Herangehensweise anderer Unternehmen bzw. Organisationen, die sowohl eigene, interne Abteilungen als auch externe, mitunter auch branchenfremde Firmen umfassen können.³¹³

³⁰⁷ vgl. BÜSCH (2013), S. 77

³⁰⁸ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 32; SEILHEIMER (2007), S. 7; CAMP (1994), S. 15

³⁰⁹ David T. KEARNS in CAMP (1994), S. 13

³¹⁰ Das Toyota Produktionssystem hat zum Ziel, „(...) die Qualität durch ständige Verbesserung von Prozessen und Vermeidung der Verschwendung von natürlichen, menschlichen und unternehmerischen Ressourcen zu optimieren“. [TOYOTA (2010), S. 1].

Das System beruht auf dem Prinzip des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KAIZEN).

³¹¹ vgl. MEYER (1996)

³¹² vgl. BÜSCH (2013), S. 77; CAMP (1994), S. 19

³¹³ vgl. SIEBERT, KEMPF (2008), S. 8

Die Grundidee des Benchmarking fand bereits Anfang des 20. Jahrhunderts erste Anwendung. Henry Ford, der Begründer der Fließbandproduktion, hat sich bei der Suche nach Produktionssteigerungen von den Einschienenhängebahnen in Großschlachtereien inspirieren lassen.³¹⁴

Eine verstärkte Anwendung dieser Methode erfolgte in den 1960er Jahren in Japan. Mit dem Bestreben in allen Bereichen eine Führungsposition einzunehmen adaptierten japanische Firmen die Prozesse anderer Unternehmen. Dies führte dazu, dass japanische Produkte in einem großen Umfang weltweit Marktanteile hinzugewinnen konnten. Allen voran stieg die Firma TOYOTA während dieser Zeit durch die Entwicklung des Kanban-Systems³¹⁵ zu einem der führenden Automobilhersteller auf.³¹⁶ Der Begriff „Benchmarking“ war bis dahin nicht bekannt.

Erst Ende der 1970er Jahre erfolgte durch David T. KEARNS eine Systematisierung der Methodik. Durch die Einführung des Managementinstrumentes „Benchmarking“ konnte die Firma RANK XEROX, die an die japanische Konkurrenz verlorenen Marktanteile zurückgewinnen und so den Umsatz deutlich steigern. Die hierfür durchgeführten Untersuchungen gelten als erste Benchmarking-Studie.³¹⁷

Bis heute hat das damals entwickelte Konzept der systematischen Erfassung und Auswertung von Prozessen, zur Auffindung von Verbesserungspotentialen, mit dem Ziel des Best-Practise seine Gültigkeit. Lediglich kleinere Erweiterungen bzw. Adaptionen auf andere Bereiche wurden in den letzten Jahren vorgenommen. Beispielsweise in Form des kennzahlenbasierenden Immobilien-Benchmarking.³¹⁸

4.2 Funktion, Ziele und Nutzen

Im Gegensatz zum reinen Vergleich von Prozessen oder Kennzahlen erfolgt beim Benchmarking eine weiterführende Analyse über den Grund der vorhandenen Differenz.³¹⁹ Es erfüllt somit mehrere Funktionen. Durch das Sammeln der Daten erfolgen eine dezidierte Auseinandersetzung mit dem Untersuchungsgegenstand sowie eine Analyse der eigenen Prozesse bzw. Kennzahlen. Durch die Gegenüberstellung der Daten lassen sich Defizite, sog. Leistungslücken erkennen.³²⁰ Verbesserungspotentiale werden dadurch systematisch aufgezeigt und dienen gleichzeitig als Zielstellung für die Optimierung der eigenen Vorgehensweise. Dafür notwendig ist eine exakte Analyse der Prozesse, um den Grund für die Defizite zu erkennen und eine Adaption auf die eigenen Vorgänge vornehmen zu können. WATSON spricht bei den relevanten Faktoren, die für einen Ablauf verantwortlich sind, von „*Prozesskatalysatoren*“.³²¹ Durch die Gegenüberstellung unterschiedlicher Merkmale werden auch Teile in den Verbesserungsprozess mit einbezogen, die nicht dem Wettbewerb unterliegen.³²²

³¹⁴ vgl. SIEBERT (1998), S. 15

³¹⁵ Das Kanban-System ist eine Methode zur Steuerung der Produktionsprozesse. Grundprinzip ist die Produktion auf Abruf, so dass ausschließlich die für die Produktion notwendige Menge an Bauteilen vorgehalten wird. [vgl. BOGENBERGER (2009), S. 38 (nach GABLER (1995), S. 150)]

³¹⁶ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 38

³¹⁷ vgl. SEILHEIMER (2007), S. 12 f

³¹⁸ siehe hierzu REISBECK, SCHÖNE (2009) oder auch SEILHEIMER (2007)

³¹⁹ vgl. TÖPFER, MANN (1997), S. 34

³²⁰ vgl. CAMP (1994), S. 151; SABISCH, TINTELNOT (1997), S. 14 bzw. S. 39

³²¹ vgl. WATSON (1993), S. 66

³²² vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1994), S. 4

Nebeneffekt des Benchmarking ist das gewonnene Verständnis über die Abläufe und Prozesse des eigenen und der vergleichenden, besten Prozesse anderer Unternehmungen bzw. Organisationen. BOGENBERGER zeigt weitere Nutzenpotentiale auf und differenziert diese nach quantifizierbar und nicht quantifizierbar. Unter den quantifizierbaren Nutzenpotentialen werden beispielsweise die Senkung der Betriebskosten oder die Reduzierung der Wartungs- und Instandhaltungskosten subsumiert. Als nicht quantifizierbar werden z. B. Kostentransparenz, Erhöhung der Planungs- und Budgetsicherheit oder auch die Risikoidentifizierung angeführt.³²³

Grundvoraussetzung für die Durchführung von Benchmarking ist die Messbarkeit der zu vergleichenden Merkmale. Dabei kann sowohl auf quantitative (numerische) als auch qualitative Vergleichsgrößen zurückgegriffen werden. Wichtig ist dabei die Vergleichbarkeit der einzelnen Werte. Die jeweiligen Kenngrößen sind deshalb exakt zu beschreiben und abzugrenzen.³²⁴ Für die Zielsetzung sind die entsprechenden Benchmarks an die eigenen, jeweils vorherrschenden Randbedingungen anzupassen.³²⁵

4.3 Arten des Benchmarking

Die Art des Benchmarking richtet sich nach der Quelle der Vergleichsparameter. Dabei ist zwischen internem und externem Benchmarking zu unterscheiden.³²⁶

Beim **internen Benchmarking** erfolgt eine Analyse und Gegenüberstellung mit unternehmenseigenen Einheiten.³²⁷ Beispielsweise werden verschiedene Bauwerke aus dem eigenen Portfolio einem Vergleich unterzogen. Vorteil hierbei ist eine relativ einfache Datenerhebung. Auf alle vorliegenden Daten kann uneingeschränkt zugegriffen werden und die Datenstruktur ist in vielen Fällen identisch. Aufwändige Recherchen und Datenanpassungen sind somit nicht notwendig. Durch das interne Benchmarking wird eine unternehmensinterne Angleichung der untersuchten Prozesse und Merkmale erzielt.³²⁸ Allerdings fehlt der berühmte „Blick über den Tellerrand“.³²⁹ Eine generelle firmeninterne Ineffizienz wird nicht erkannt und kann auch nicht behoben werden. Häufig fehlen dadurch neue Impulse für eine kontinuierliche Verbesserung.³³⁰

Die Vergleichsbasis beim **externen Benchmarking** umfasst Prozesse und Parameter von externen Organisationseinheiten.³³¹ Dabei wird zwischen wettbewerbsorientiertem, branchenbezogenem und branchenunabhängigem Benchmarking differenziert.³³² Das **wettbewerbsorientierte** (auch marktbezogene³³³ bzw. konkurrenzbezogene³³⁴) Benchmarking bezieht ausschließlich Firmen (bzw. Teile davon) in den Vergleich mit ein, die im direkten Wettbewerb zueinander stehen. Beispielsweise Immobilienunternehmen, die sich auf die Vermarktung von Geschäftshäusern spezialisiert haben. Der Vorteil hierbei ist, die wesentlichen Prozesse erfüllen in der Regel die gleiche Funktion, so dass diese eine sehr

³²³ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 42 f.

³²⁴ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 44

³²⁵ vgl. BÜSCH (2013), S. 80

³²⁶ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 45; MERTINS, SIEBERT (1997), S. 78 f.; SEILHEIMER (2007), S. 15

³²⁷ vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 38 bzw. S. 62

³²⁸ vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 63

³²⁹ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 46

³³⁰ vgl. BÜSCH (2013), S. 82

³³¹ vgl. MERTINS, SIEBERT (1997), S. 78

³³² vgl. BOGENBERGER (2009), S. 47

³³³ MERTINS, SIEBERT (1997), S. 78

³³⁴ SEILHEIMER (2007), S. 15 f.

gute Vergleichbarkeit aufweisen.³³⁵ Beim **branchenbezogenen** Benchmarking erfolgt eine Gegenüberstellung mit brancheninternen Einheiten.³³⁶ Im Immobiliensektor wäre dies z. B. ein Vergleich von Firmen mit einem Portfolio, das überwiegend aus Wohngebäuden besteht, mit Unternehmen, die sich auf Vermarktung und Betrieb von Hotelgebäuden spezialisiert haben. Durch die Branchenzugehörigkeit kann der Vergleich für zahlreiche Merkmale erfolgen, deren Funktionen identisch sind. Davon abweichende Prozesse sind für eine Gegenüberstellung allerdings eindeutig abzugrenzen und exakt zu definieren.³³⁷ Für ein **branchenunabhängiges** Benchmarking ist auf Vergleichspartner zurückzugreifen, deren Geschäftsfelder außerhalb der eigenen Branche einzuordnen sind.³³⁸ Die Analyse konzentriert sich hierbei häufig, bedingt durch eine fehlende Vergleichbarkeit, auf übergeordnete Organisations- und Geschäftsprozesse.³³⁹ Ein entsprechendes Benchmarking bietet jedoch das größte Potential für Verbesserungen, da durch die Branchenunabhängigkeit häufig vollständig andere Herangehensweisen vorliegen. Die zunehmende Distanz zu den eigenen Kernprozessen macht eine komplexere Adaption auf den eigenen Untersuchungsgegenstand erforderlich.³⁴⁰ Die Schwierigkeit beim externen Benchmarking liegt besonders in der Datenerhebung. Diese hängt ganz wesentlich von der Vertrauensbasis und damit der Offenheit der Vergleichspartner ab, die besonders bei konkurrierenden Unternehmen erst geschaffen werden muss. Zudem erfolgt in vielen Fällen eine unterschiedliche Datenerfassung, so dass in einem ersten Schritt die Vergleichbarkeit herzustellen ist und die zugehörigen Randbedingungen erfasst werden müssen.³⁴¹

4.4 Vorgehensweis und Methodik

Für den Ablauf eines Benchmarking-Projektes liegen eine Reihe unterschiedlicher Modelle vor. Trotz der Vielzahl an Vorgehensweisen lassen sich zwei wesentliche Modellkategorien unterscheiden. Das beispielsweise von KELLER³⁴², WATSON³⁴³ bzw. in DIN PAS 1014³⁴⁴ vorgeschlagene **Vier-Phasen-Modell** und ein Ablaufmodell mit **fünf Phasen**, veröffentlicht z. B. durch KARLÖF, ÖSTBLOM³⁴⁵ oder MERTINS, SIEBERT, KEMPF³⁴⁶. Diese beiden Grundmodelle sind trotz einer unterschiedlichen Anzahl an Phasen nahezu deckungsgleich. Das Vier-Phasen-Modell besteht aus den Grundphasen Zielsetzung/Planung, Datenerhebung, Datenanalyse und Umsetzung.³⁴⁷ Beim Fünf-Phasen-Modell ist der Ablauf identisch, jedoch wird die Phase der Datenanalyse in die Phasen Vergleich und Maßnahmenplanung unterteilt.³⁴⁸

Aufgrund der übersichtlicheren Darstellung wird im Folgenden die Vorgehensweise für das Fünf-Phasen-Modell näher erläutert. Der zugehörige Ablauf eines Benchmarkingprozesses ist in Abbildung 4.1 modellhaft dargestellt.

³³⁵ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 47

³³⁶ vgl. MERTINS, SIEBERT (1997), S. 78

³³⁷ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 48

³³⁸ vgl. SEILHEIMER (2007), S. 16

³³⁹ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 50; MERTINS, SIEBERT (1997), S. 79

³⁴⁰ vgl. SEILHEIMER (2007), S. 16 f.

³⁴¹ vgl. BOGENBERGER (2009), S. 50; MERTINS, SIEBERT (1997), S. 79; SEILHEIMER (2007), S. 16 f.

³⁴² KELLER (1996), S. 24 ff.

³⁴³ WATSON (1993), S. 82 ff.

³⁴⁴ DIN PAS 1014 (2001), S. 2 ff.

³⁴⁵ KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 86 ff.

³⁴⁶ MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVI ff.

³⁴⁷ vgl. WATSON (1993), S. 82 f.

³⁴⁸ vgl. MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVIII

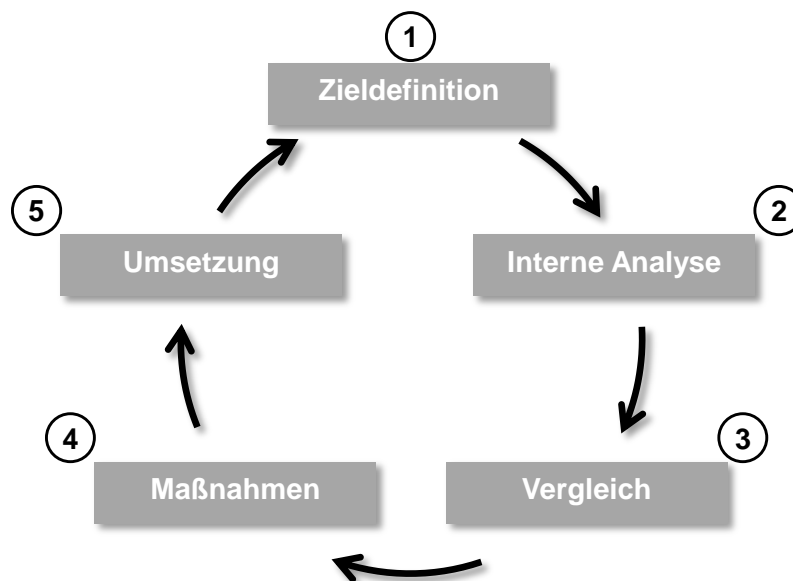


Abbildung 4.1: Fünf-Phasen-Ablaufmodell des Benchmarking³⁴⁹

Die Phase der **Zieldefinition** dient zur Schaffung der Voraussetzungen für die Durchführung des Benchmarking. Dabei werden die Ziele vorgegeben (z. B. Steigerung der Effizienz, Reduzierung der Nutzungskosten), die mit dem Benchmarking umgesetzt werden sollen. Der Untersuchungsgegenstand wird definiert und eingegrenzt. Es ist festzulegen, wie die einzelnen Merkmale gemessen und welche weiteren Daten darüber hinaus erfasst werden müssen. Zusätzlich ist die Art des Benchmarking (intern oder extern) festzulegen.³⁵⁰

Im Rahmen der **internen Analyse** wird, aufbauend auf Phase 1, der eigene Untersuchungsgegenstand strukturiert und analysiert. Dazu notwendig ist eine Abgrenzung und Beschreibung der einzelnen Merkmale, um einen Abgleich mit den Daten des Vergleichspartners zu ermöglichen. Die eigenen Daten sind entsprechend dieser Vorgaben zu erfassen und zu analysieren.³⁵¹

Für den **Vergleich** sind geeignete Vergleichspartner einzubinden. Dabei sollte auf die Exzellenz der externen Prozesse bzw. Unternehmen geachtet werden, um möglichst von den Besten zu lernen und die Effektivität des Benchmarking zu steigern. Die vom Vergleichspartner zur Verfügung gestellten Daten sind den eigenen Kennzahlen gegenüberzustellen. Diese können sowohl Primärdaten (Daten aus direkter Erhebung von Vergleichsunternehmen) oder Sekundärdaten (Daten aus Publikationen, Datenbanken usw.) umfassen.³⁵² Die bei dem Vergleich festgestellten Differenzen sind zu bewerten und die Ursachen für die Leistungslücken herauszuarbeiten.³⁵³

Kern des Benchmarkingprozesses ist die Entwicklung und Festlegung von **Maßnahmen** zur Zielerreichung. Hierfür sind aus den in Phase 3 gewonnenen Erkenntnissen Verbesserungsvorschläge abzuleiten. Diese sind hinsichtlich Realisierbarkeit, Kosten und Nutzen zu bewerten. Die in Phase 1 festgelegten Ziele gilt es dabei zu beachten. Abschließend

³⁴⁹ in Anlehnung an MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVII

³⁵⁰ vgl. DIN PAS 1014 (2001), S. 3; MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVI f.; SEILHEIMER (2007), S. 27

³⁵¹ vgl. MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVII

³⁵² vgl. OSSADNIK (2009), S. 324

³⁵³ vgl. DIN PAS 1014 (2001), S. 8; KELLER (1996), S. 25.; SEILHEIMER (2007), S. 27 ff.

sind konkrete Maßnahmen zu beschließen. Diese sollen die Best-Practise nicht einfach kopieren. Vielmehr hat eine Adaption auf die Randbedingungen im eigenen Unternehmen zu erfolgen, wobei eine Steigerung des Leistungsziels gegenüber den Werten den Vergleichspartners anzustreben ist.³⁵⁴

Abschließend erfolgt die **Umsetzung** der in Phase 4 beschlossenen Maßnahmen. Dazu ist eine Zerlegung in einzelne, messbare Teilmaßnahmen notwendig. Entsprechende Ziele sind – ausgehend von Phase 1 – zu definieren. Für die Umsetzung selbst ist eine Vorgehensweise zu beschließen, die auch ein Controlling und eine Erfolgskontrolle zulässt.³⁵⁵

Im nächsten Schritt erfolgt eine Bestimmung einer neuen Zielstellung und damit ein erneuter Einstieg in den Benchmarking-Zyklus für eine kontinuierliche Verbesserung.

Die Ansätze zur kontinuierlichen Optimierung von Tunnelbauwerken werden in Abs. 9 gezielt angepasst und in einer eigenständigen Methodik umgesetzt.

³⁵⁴ vgl. MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVII f.; WATSON (1993), S. 91 f.

³⁵⁵ vgl. DIN PAS 1014 (2001), S. 8 f.; MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995), S. XVIII; WATSON (1993), S. 92 ff.

5 Lebenszykluskostenmodell für Tunnelbauwerke

In den vorangegangenen Abs. 3 und 4 wurden die Grundlagen für eine ganzheitliche Optimierung der Kosten von Tunnelbauwerken erörtert. Als wesentliche Erkenntnis bleibt festzuhalten, dass die Lebenszyklusphilosophie einen geeigneten Ansatz für eine ganzheitliche Erfassung der Kosten des Untersuchungsgegenstandes bietet.

Im nächsten Schritt ist aus den Grundlagen heraus ein geeignetes Lebenszykluskostenmodell zu entwickeln. Hierfür ist auf die Frage einzugehen, ob ein hierarchisch strukturiertes Lebenszykluskostenmodell dazu geeignet ist, die an das Modell gestellten Anforderungen gemäß Abs. 2.3 vollumfänglich zu erfüllen. Ist ein rein hierarchisches Modell nicht geeignet, so ist eine geeignete Struktur für das Lebenszykluskostenmodell zu entwickeln.

5.1 Anforderungen und Zielstellung

In Abs. 2.3 wurden aus dem Forschungsbedarf heraus, die wesentlichen Anforderungen an das zu entwickelnde Lebenszykluskostenmodell und die zugehörige Methodik definiert. Für die nachfolgende Modellentwicklung gilt es, diese Grundsätze aufzugreifen und konsequent umzusetzen.

- Ganzheitlichkeit
- Nachvollziehbarkeit und Transparenz
- Detaillierung und Anpassungsfähigkeit
- Konsistente und wiederverwendbare Kostenstruktur

Ergänzend sind zur Umsetzung der weiterführenden Kriterien

- Generierung von Substitutions- und Optimierungspotentialen sowie
- Berücksichtigung von Unsicherheiten

mit dem Modell bereits die notwendigen Grundlagen zu schaffen.

5.2 Grundlagen der Modellentwicklung

Abweichend vom allgemeinen Verständnis, handelt es sich bei Modellen nicht zwangsläufig um verkleinerte (bzw. vergrößerte) physische Abbilder von Ausgangsobjekten. Modelle sind an sich unabhängig von der Gestaltungs- bzw. Darstellungsform. Wesentlich ist die Analogie zwischen Original und Modell hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes.³⁵⁶

Der Begriff „Modell“ wurde bereits vielfach in unterschiedlichen Quellen definiert. Die Modelltheorie dient dabei nahezu allen Auslegungen als Ausgangsbasis.³⁵⁷ Beispielsweise ist gemäß VDI-Richtlinie 3633 - Blatt 1 ein Modell ...

„(...) eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Es unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild.“³⁵⁸

³⁵⁶ vgl. DAENZER (1976), S. 13

³⁵⁷ beispielsweise nach STACHOWIAK (1973) oder STACHOWIAK (1983)

³⁵⁸ VDI (2010), S. 3

Ausgehend von dieser Definition gilt es zur Modellbildung – auch für ein Lebenszykluskostenmodell von Tunnelbauwerken – die drei Grundmerkmale der allgemeinen Modelltheorie nach STACHOWIAK zu berücksichtigen.³⁵⁹

▪ **Abbildungsmerkmal**

„Modelle sind stets Modelle von etwas, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.“³⁶⁰

Mit Hilfe des Abbildungsmerkmals wird sichergestellt, dass die Eigenschaften des Originals, durch das Modell richtig wiedergegeben (abgebildet) werden. Wesentlich dabei sind Struktur und Funktionsweise.

▪ **Verkürzungsmerkmal**

„Modelle erfassen im Allgemeinen nicht alle Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellnutzern relevant scheinen.“³⁶¹

Das Modell umfasst nicht alle Eigenschaften des Originals. Vielmehr richtet sich der Fokus auf wesentliche, für die Zielstellung signifikante Elemente und Attribute.

▪ **Pragmatisches Merkmal**

„Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für bestimmte (...) Subjekte, b) innerhalb bestimmter Zeitintervalle und c) unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen.“³⁶²

Ein Modell ist hinsichtlich seiner Nutzbarkeit zu entwickeln. Dazu sind die erforderlichen Eigenschaften richtig abzubilden und in verständlicher Form in das Modell einzubinden.

Bei der Umsetzung der modelltheoretischen Grundmerkmale ist besonders auf eine Ausgewogenheit zwischen Abbildung, Verkürzung und Pragmatismus hinsichtlich der Zielstellung zu achten. Nach DANGELMAIER ist ein „(...) Kompromiss zu finden zwischen Richtigkeit einerseits und Genauigkeit, Verständlichkeit und Handhabbarkeit eines Modells andererseits (...)“³⁶³ (Abbildung 5.1).

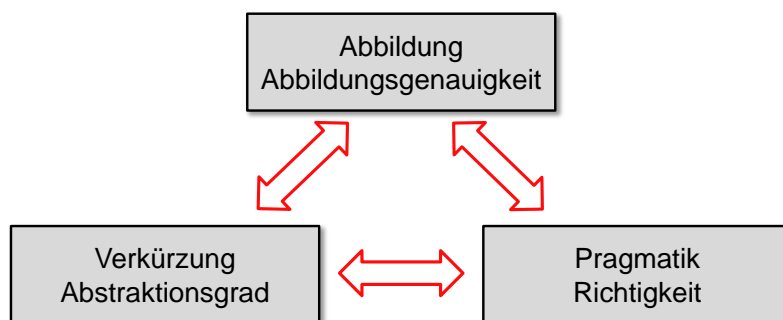


Abbildung 5.1: Zielkonflikt der Modelltheorie³⁶⁴

³⁵⁹ vgl. STACHOWIAK (1973), S. 131 ff.

³⁶⁰ STACHOWIAK (1973), S. 131

³⁶¹ STACHOWIAK (1973), S. 132

³⁶² STACHOWIAK (1973), S. 132 f.

³⁶³ DANGELMAIER (2003), S. 41, siehe hierzu auch FÜRNRÖHR (1992) S. 20 f.

³⁶⁴ in Anlehnung an DANGELMAIER (2003), S. 41 und TIMM (2008), S. 13

Zur Abbildung von Originalen in Modellen greift die Modelltheorie auf sogenannte Individuen und Attribute zurück. Individuen sind vergleichbar mit Systemen (auch Teil- und Subsystemen) aus der Systemtheorie und umfassen die Gesamtheit von Elementen, die durch Beziehungen miteinander verbunden sind.³⁶⁵ Attribute entsprechen Merkmalen und Eigenschaften von Individuen, Relationen zwischen Individuen, Ausprägungen von Eigenschaften, Relationen von Eigenschaften usw.³⁶⁶

Bezogen auf die vorliegende Problemstellung bedeutet dies, dass das originäre Tunnelbauwerk als System bzw. Individuum, die Ausprägungen – insbesondere die Kosten – sowie die bestehenden Beziehungen als Attribute zu verstehen sind (Abbildung 5.2).

Modelltheorie	Systemtheorie	Lebenszykluskostenmodell
Individuum	System Teil-System Sub-System Element	Tunnelbauwerk Bauteil
Attribute	Eigenschaften Merkmale	Kosten Einflussgrößen Abhängigkeiten

Abbildung 5.2: Einordnung des Lebenszykluskostenmodells hinsichtlich Modell- bzw. Systemtheorie

Mit dem zu entwickelnden Lebenszykluskostenmodell erfolgt eine Abstraktion der anfallenden Kosten über den gesamten Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes. Das Abbildungsmerkmal der Modelltheorie entspricht der Darstellung und Zusammenstellung der Lebenszykluskosten. Die Reduzierung auf die Lebenszykluskosten und den damit in Verbindung stehenden Attributen bestimmt das Verkürzungsmerkmal. Die Umsetzung des pragmatischen Merkmals aus der Modelltheorie erfolgt durch hierarchische Strukturierung des Tunnelbauwerkes, respektive der Kosten.

5.3 Entwicklung einer hierarchisch-modularen Modellstruktur

Zur Entwicklung eines Lebenszykluskostenmodells wird im ersten Schritt untersucht, inwieweit eine hierarchische Strukturierung eines Tunnelbauwerkes und der korrespondierenden Kosten zur Umsetzung der Anforderungen ausreichend ist. Im zweiten Schritt erfolgt eine gezielte Anpassung der Strukturierung durch Implementierung einer modularen Struktur.

5.3.1 Hierarchische Strukturierung

Der systemtheoretische Ansatz verfolgt das Ziel, aus spezifischen Eigenschaften von realen Systemen, die grundsätzlichen Strukturen zu abstrahieren.³⁶⁷ Zur Reduzierung der Komplexität und letztlich zur Lösung der Problemstellung wird eine hierarchische Strukturierung des Gesamtsystems vorgeschlagen.

³⁶⁵ vgl. DAENZER (1976), S. 11; MAYER, WARNER (1997), S. 84

³⁶⁶ vgl. STACHOWIAK (1973), S. 134

³⁶⁷ vgl. GÖPFERT (1998), S. 10

INTRA stellt hierzu fest:

„Zur ganzheitlichen Abbildung von realen Systemen hoher Komplexität und begrenztem zweckmäßigen Informationsumfang müssen Modelle unterschiedliche Detaillierungsstufen aufweisen.“³⁶⁸

LUHMANN spricht dabei von „Ausdifferenzierung“³⁶⁹, SIMON verwendet den Begriff „hierarchische Dekomposition.“³⁷⁰ Wissenschaftlich betrachtet handelt es sich um eine analytische Zerlegung von Systemen in einzelne Bestandteile, die wiederum als eigene Untersysteme (Subsysteme) zu verstehen sind. Zur weiteren Veranschaulichung werden diese Subsysteme als eigenes System aufgefasst und wiederum in Untersysteme unterteilt.³⁷¹ Die Ausdifferenzierung erfolgt bis zu der Tiefe, in der der angestrebte Erkenntnisgewinn zu verzeichnen ist. In der detailliertesten Unterteilungsstufe liegen dann Elemente als Bestandteile der Systeme vor, die nicht weiter dekomponiert werden (Abbildung 5.3).³⁷²

Auf den jeweiligen Systemebenen wird das vollständige (Ausgangs-) System abgebildet. Dabei nimmt der Detaillierungsgrad, ausgehend vom Gesamtsystem, mit steigender Dekomposition zu. Gleichzeitig ist mit anwachsender Detaillierung eine Zunahme der Komplexität der Betrachtungsebene zu verzeichnen. Aus Gründen der Anwendbarkeit und der Übersicht ist die angestrebte Detaillierung mit der Zielstellung in Einklang zu bringen.

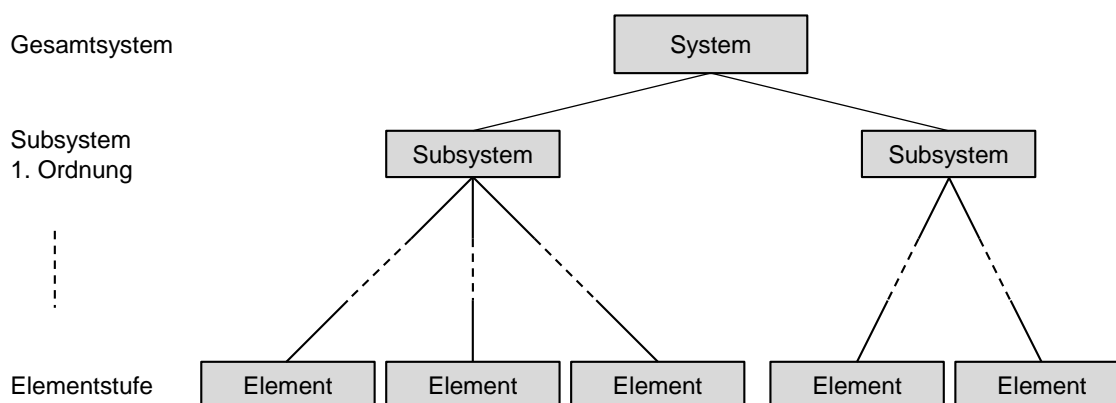


Abbildung 5.3: Hierarchische Dekomposition auf Basis der Systemtheorie³⁷³

Das Gesamtsystem definiert sich als die Gesamtheit von Elementen, die durch Beziehungen miteinander in Verbindung stehen.³⁷⁴ Die vorhandenen Beziehungen sind in vertikale (über Betrachtungsebenen hinweg) und horizontale (zwischen Subsystemen innerhalb einer Betrachtungsebene) Verknüpfungen zu differenzieren und bilden die Beziehungsstruktur des Gesamtsystems ab (Abbildung 5.4). Zusammen mit der hierarchischen Struktur definieren die beiden Strukturelemente den Grundaufbau eines Systems bzw. die Systemarchitektur.³⁷⁵

³⁶⁸ INTRA (2000), S. 41

³⁶⁹ LUHMANN (1991), S. 84

³⁷⁰ SIMON (1962), S. 468 und S. 474

³⁷¹ vgl. GÖPFERT (1998), S. 15

³⁷² vgl. DAENZER (1976), S. 16; MEYER, WARNER (1997), S. 84; GÖPFERT (1998), S. 16

³⁷³ in Anlehnung an DAENZER (1976), S. 16 bzw. GÖPFERT (1998), S. 16

³⁷⁴ vgl. MEYER, WARNER (1997), S. 84

³⁷⁵ vgl. GÖPFERT (1998), S. 20

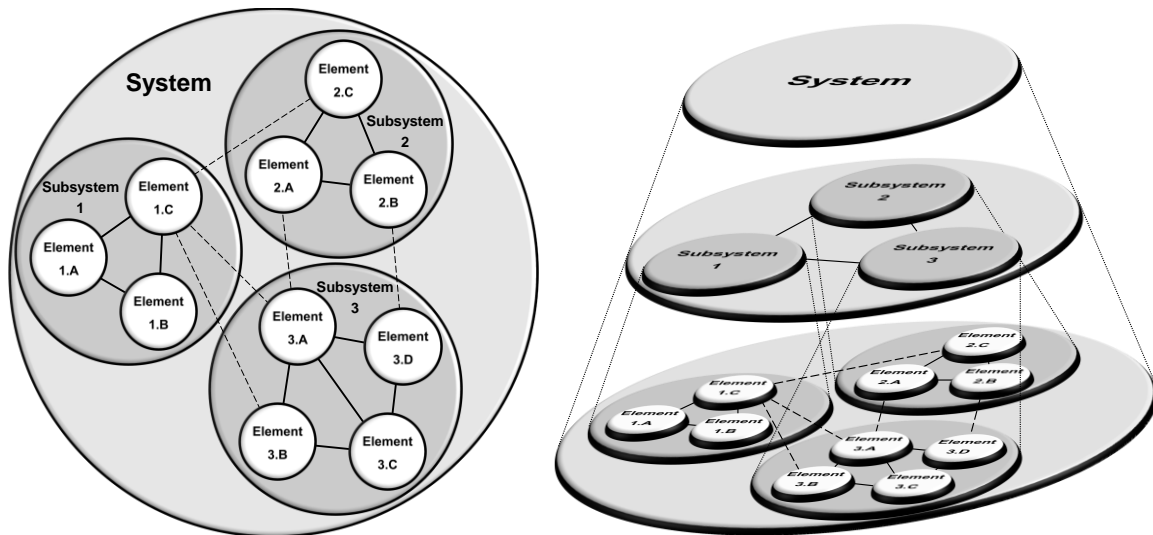


Abbildung 5.4: Systemarchitektur – Visualisierung³⁷⁶

Mit Hilfe einer hierarchischen Strukturierung und der dabei vorgenommenen Detaillierung auf unterschiedlichen Ebenen sind drei grundsätzliche Systemabbildungen umsetzbar (Abbildung 5.5).³⁷⁷

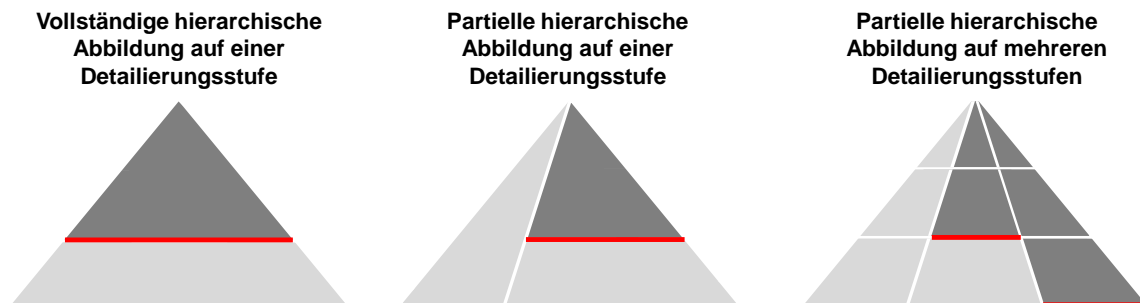


Abbildung 5.5: Abbildungsmöglichkeiten bei einer rein hierarchischen Modellierung³⁷⁸

▪ Vollständige hierarchische Abbildung auf einer Detaillierungsstufe

Das vollständige Modell wird auf einer Betrachtungsebene analysiert. Dazu sind alle Elemente des realen Modells auf der gewählten Detaillierungsstufe einzubeziehen.

Vorteil: Vollständige Betrachtung des realen Untersuchungsgegenstandes.
Die Komplexität der Dekomposition ist gering.

Nachteil: Eine Detaillierung einzelner Bereiche ist nicht realisierbar.

Das Modell kann hinsichtlich einer Veränderung der Zielstellung bzw. des Untersuchungsrahmens nicht flexibel angepasst oder erweitert werden.

▪ Partielle hierarchische Abbildung auf einer Detaillierungsstufe

Die Betrachtungen beschränken sich auf Teilbereiche des realen Modells. Dabei werden alle relevanten Elemente auf einer Betrachtungsebene analysiert.

Vorteil: Detailliertere Betrachtungen von Teilbereichen sind auf einer Betrachtungsebene möglich.

³⁷⁶ in Anlehnung an DAENZER (1976), S. 17 bzw. GÖPFERT (1998), S. 22

³⁷⁷ vgl. INTRA (2000), S. 52 f.; NEUHAUSEN (2001), S. 51 f.

³⁷⁸ in Anlehnung an INTRA (2000), S. 52

Nachteil: Eine weitergehende Detaillierung einzelner Bereiche von Subsystemen kann nicht umgesetzt werden.
 Durch die Beschränkung auf Teilbereiche besteht die Gefahr Wechselwirkungen mit anderen, nicht einbezogenen Subsystemen nur unzureichend zu berücksichtigen.
 Das Modell kann hinsichtlich einer Veränderung der Zielstellung bzw. des Untersuchungsrahmens nicht flexibel angepasst werden.

▪ **Partielle hierarchische Abbildung auf mehreren Detaillierungsstufen**

Für die Analyse können unterschiedliche Betrachtungsebenen für einzelne Subsysteme einbezogen werden.

Vorteil: Detailliertere Betrachtung von Teilbereichen auf einer Betrachtungsebene sowie einer gleichzeitigen Betrachtung weiterer Teilbereiche auf übergeordneten Ebenen.

Nachteil: Eine differenziertere Betrachtung einzelner Bereiche von Subsystemen kann nicht erfolgen.
 Es besteht die Gefahr Wechselwirkungen mit anderen, nicht einbezogenen Subsystemen, zu vernachlässigen.
 Eine Anpassung des Modells hinsichtlich einer Veränderung der Zielstellung bzw. des Untersuchungsrahmens kann nicht erfolgen.

Es bleibt festzuhalten, dass zur Anwendung der einzelnen Abbildungsmöglichkeiten, die Voraussetzung zu erfüllen ist, dass die erforderliche Strukturierung bereits bei der Modellbildung vorgenommen wurde. Eine spätere Anpassung an den jeweiligen Planungs- und Informationsstand ist nicht oder nur durch Veränderung der vorherigen Strukturierung möglich. Gleiches gilt für nachträgliche, detaillierte Untersuchungen einzelner Bereiche.

Allein mit einer hierarchischen Struktur können die Forderungen nicht erfüllt werden. Zur Umsetzung der gestellten Anforderungen des zu entwickelnden Lebenszykluskostenmodells hat eine Erweiterung der hierarchischen Strukturierung zu erfolgen. Insbesondere die Forderung nach einer gezielten Detaillierung (auch nur einzelner Bereiche) sowie der Anpassungsfähigkeit an Veränderungen hinsichtlich des Untersuchungsrahmens bzw. der Zielstellung bedingen eine Erweiterung.

5.3.2 Hierarchisch-modulare Strukturierung

Ein hierarchisch strukturiertes und modular aufgebautes Modell verbindet die Forderungen nach einer allgemeingültigen Grundstruktur mit der gewünschten Flexibilität. Modular bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein System in weitestgehend unabhängige Subsysteme bzw. Einheiten dekomponiert werden kann.³⁷⁹ Es handelt sich letztlich um eine „(...) Zerlegung eines Systems in kleine, weitgehend unabhängige Einheiten (...)“.³⁸⁰ Vorhandene Interdependenzen dürfen dabei nur schwach ausgeprägt sein.

Neben diesem Unabhängigkeitsprinzip besteht eine weitere Forderung darin, dass ein System aus der Summe seiner Module aggregierbar ist. Dies bedeutet, dass eine Integrität gewährleistet sein muss, wobei die durch die Moduleinteilung vernachlässigten Beziehungen Beachtung finden müssen.³⁸¹

³⁷⁹ vgl. SIMON (1962), S. 474; ULRICH (1994), S. 221

³⁸⁰ vgl. HEINRICH (1994), S. 252

³⁸¹ vgl. GÖPFERT (1998), S. 53

Durch die Umsetzung der beiden Prinzipien (Unabhängigkeit und Integrität) ergibt sich der wesentliche Vorteil der Modularisierung. Einzelne Elemente (Module) einer Systemebene können aufgrund der scheinbaren Unabhängigkeit und unter Berücksichtigung vorhandener Beziehungen isoliert einer eingehenden Analyse unterzogen werden (Abbildung 5.6). Die zusätzliche hierarchische Strukturierung eröffnet darüber hinaus die Möglichkeit, weitere Elemente des Subsystems in übergeordneter Form einzubeziehen. Die Betrachtungen können dadurch auf die vorliegende Planungs- und Informationstiefe angepasst werden. Ein flexibler Austausch bzw. eine Anpassung und Erweiterung des Systems ist gewährleistet. Auch eine Beschränkung auf einen eingegrenzten Untersuchungsrahmen (z. B. nur eines Moduls) ist – unter Beachtung der vorhandenen Interdependenzen – realisierbar. Dies bedeutet, dass sich das Gesamtsystem, unabhängig vom Zeitpunkt der Betrachtungen, an die jeweilige Zielstellung bzw. an den Untersuchungsrahmen baukastenartig anpassen lässt.

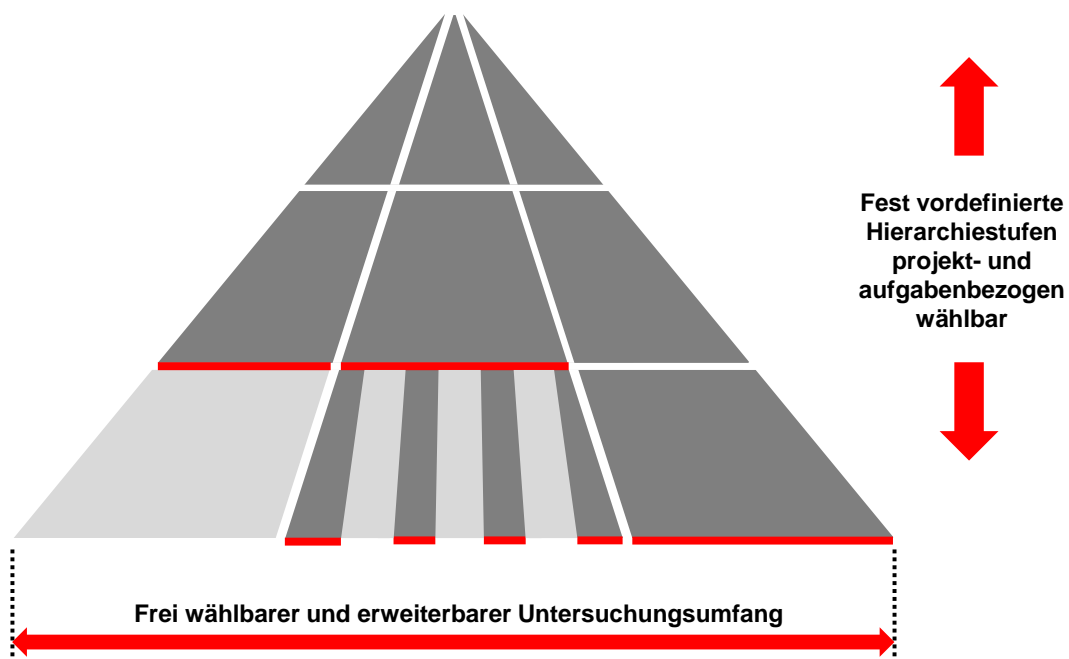


Abbildung 5.6: Flexible Abbildung des Untersuchungsumfangs bzw. -gegenstands bei einer hierarchisch-modularen Strukturierung³⁸²

Mit der Modularisierung entsteht die Möglichkeit, bereits entwickelte Lösungsansätze (Struktur, Module, Kosten etc.) durch geringfügige Modifikation auf andere Projekte zu übertragen.³⁸³ Von bereits realisierten bzw. untersuchten Projekten können einzelne Module mit einer zum Teil sehr hohen Detailtiefe übernommen bzw. mit Hilfe der vorliegenden Parameter und Abhängigkeiten den neuen Rahmenbedingungen angepasst werden.

Zur Umsetzung der gestellten Anforderungen wird für die Entwicklung eines geeigneten Lebenszykluskostenmodells im Weiteren auf eine hierarchisch-modulare Strukturierung zurückgegriffen. Dabei gilt es zunächst, die vorgestellte Systematik auf Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur zu übertragen und die notwendigen Bestandteile (Systemebenen, Module, Beziehungen usw.) zu bestimmen.

³⁸² in Anlehnung an INTRA (2000), S. 53

³⁸³ vgl. ULRICH (1994), S. 219

6 Modulares Prozessmodell

In den vorstehenden Abs. 5.2 und 5.3 wurde eine allgemeingültige Struktur zur Modellierung komplexer Systeme hergeleitet, die die unter Abs. 2.3 gestellten Anforderungen an ein Lebenszykluskostenmodell für Tunnelbauwerke berücksichtigt. Zur Umsetzung wird nachfolgend die hierarchisch-modulare Struktur auf die Anforderungen von Straßentunnelbauwerken und den dabei zu berücksichtigenden Kosten allgemeingültig adaptiert.

6.1 Hierarchisch-modulare Strukturierung der Kosten von Straßentunneln

Bei Tunnelbauwerken der Straßeninfrastruktur handelt es sich um anspruchsvolle Ingenieurbauwerke, die sich aufgrund steigender Sicherheitsanforderungen immer mehr zu komplexen technischen Anlagen wandeln.³⁸⁴ Damit einher geht eine Steigerung der Folgekosten, die für den Betrieb der technischen Ausstattung erforderlich wird. Zur ganzheitlichen ökonomischen Bewertung und Optimierung von Tunnelbauwerken sind aus diesem Grund die Kosten aller Lebensphasen einzubeziehen. Für eine aktive Beeinflussung der Gesamtkosten sind die Erst- und Folgekosten in der Form zu erfassen, dass eine verursachergerechte Zuweisung möglich wird. Entsprechend der in Abs. 3.1.2 vorgenommenen Einteilung der Lebensphasen für Tunnelbauwerke umfassen die Erstkosten die Kosten für Planung und Umsetzung. Alle nach der Inbetriebnahme anfallenden Kosten sind als Folgekosten zu subsummieren und differenzieren sich in Nutzungs- und Verwertungskosten (Abbildung 6.1).³⁸⁵ Die hierarchisch-modulare Strukturierung des Bauwerkes ist daraufhin auszurichten.

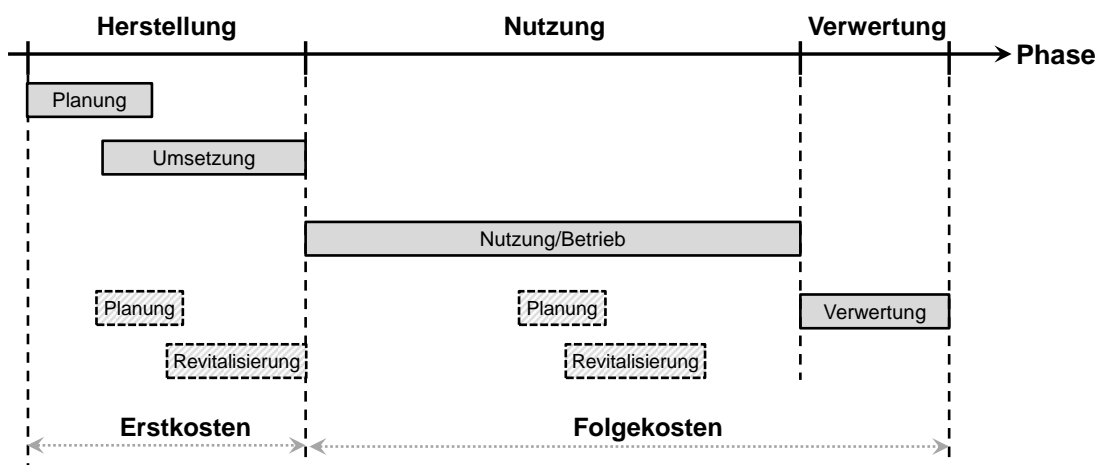


Abbildung 6.1: Einteilung von Erst- und Folgekosten von Tunnelbauwerken³⁸⁶

6.1.1 Strukturebene 1: Bauwerksebene

Ausgangsbasis für eine kaskadenartige Strukturierung des Bauwerkes stellt die Bauwerksebene dar. Diese umfasst den angestrebten Untersuchungsrahmen des Tunnelbauwerkes (Abbildung 6.3).

³⁸⁴ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 243

³⁸⁵ vgl. VOGT, THEWES (2013), S. 823; SCHWARZ ET AL. (2013), S. 115 f.

³⁸⁶ ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 485

6.1.2 Strukturebene 2: Systemebene

In der zweiten Strukturebene erfolgt eine Differenzierung hinsichtlich der Bereiche Baukonstruktion (Innenschale, Portale usw.) und Tunnelausstattung (Beleuchtung, Lüftung usw.). Dieses Vorgehen ist dadurch begründet, dass die Planung und Umsetzung der Tunnelausstattung fachlich sowie zeitlich von den Leistungen für das eigentliche Bauwerk getrennt sind. Weiter gilt es zu berücksichtigen, dass die Tunnelausstattung, gegenüber dem eigentlichen Tunnelbauwerk, eine weitaus geringere Lebensdauer aufweist. Für die Nutzungsdauer der Baukonstruktion ist von ca. 100 Jahren, währenddessen bei der Tunnelausstattung von durchschnittlich 20 Jahren auszugehen ist.³⁸⁷ Die zunehmende computerunterstützte Steuerung bzw. Automatisierung führt inzwischen dazu, dass sich die Nutzungsdauer einzelner Ausstattungsbauteile noch weiter reduziert.³⁸⁸ Im Zusammenspiel mit den umfangreichen Leistungen zur Wahrung der Nutzungssicherheit resultiert hieraus ein deutlich höherer Anteil an Folgekosten für die Tunnelausstattung gegenüber der Baukonstruktion (Abbildung 6.2). Für die angestrebte verursachergerechte Zuweisung der Folgekosten wird aus diesem Grund eine Differenzierung zwischen Bauwerk und Ausstattung vorgenommen. Dieses Vorgehen ist auch deshalb angeraten, da die bisherigen Kostenplanungen auf Basis der AKS bzw. RAB-ING eine Trennung von Bauwerk (Hauptgruppe 6 bzw. 7) und betriebstechnischer Ausstattung (Hauptgruppe 8) vorsehen.³⁸⁹

Mit Blick auf die Folgekosten ist die Differenzierung hinsichtlich der Bauhilfsmaßnahmen zu erweitern. Diese umfassen beispielsweise die Ausbruchssicherung, Wasserhaltung oder Baustelleneinrichtung und können – insbesondere in urbanen Umgebungen – einen Großteil der Herstellkosten bewirken. In der Regel handelt es sich dabei um einmalige Leistungen und Aufwendungen, so dass hieraus – insbesondere während der Nutzungsphase – keine Folgekosten erwachsen (Abbildung 6.2).³⁹⁰

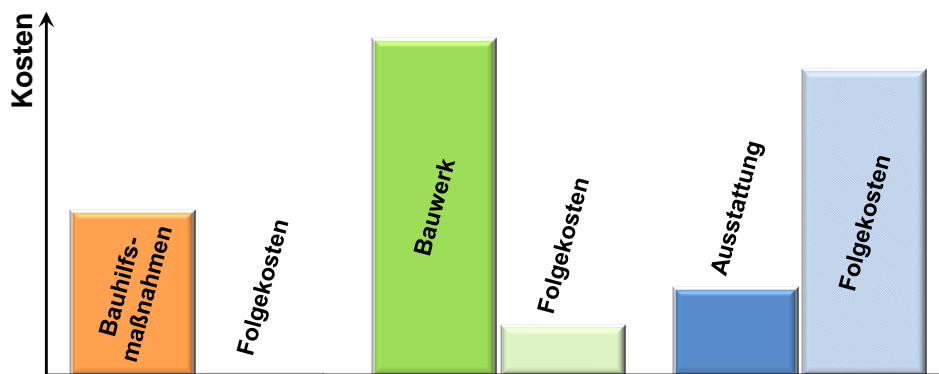


Abbildung 6.2: Qualitative Verteilung der Erst- und Folgekosten von Tunnelbauwerken³⁹¹

³⁸⁷ In der ABBV ist für Tunnelbauwerke in geschlossener Bauweise eine theoretische Nutzungsdauer von 130 Jahren, für in offener Bauweise errichtete Bauwerke eine Nutzungsdauer von 90 Jahren vorgesehen. Für die Tunnelausstattung ist eine Nutzungsdauer von 20 Jahren ausgewiesen.
vgl. BMVBS (2010)_B, S. 11

Gemäß PIARC sind für Tunnel allgemein ca. 120 Jahre als Nutzungsdauer, für die Ausstattungs-elemente zwischen 5 bis 50 Jahre zu berücksichtigen.
vgl. PIARC (1999), S. 15

³⁸⁸ Experten gehen hier von Nutzungsdauern von ca. 10 Jahren aus. [vgl. WATTL (2008), S. 62]

³⁸⁹ vgl. BMVBW (1995), Anhang 2, S. 4; siehe hierzu auch Abs. 2.1.1.3

³⁹⁰ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 243

³⁹¹ in Anlehnung an SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 243; ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 487

Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit von Bauwerken bzw. alternativen Entwürfen ist der Ansatz um die in vielen Fällen nur bedingt mit der Baukonstruktion bzw. der Tunnelausstattung in Verbindung stehenden Kosten zu vervollständigen. Die Abgrenzung der Leistungen und Aufwendungen hat dahingehend zu erfolgen, dass Bauteile, die eine dauerhafte Aufgabe für das Bauwerk übernehmen, der Baukonstruktion bzw. der Ausstattung zu zuordnen sind. Kurzfristige, temporäre Maßnahmen (Sicherung, Verkehrsumlegungen usw.) sind als Bauhilfsmaßnahmen zu verstehen.

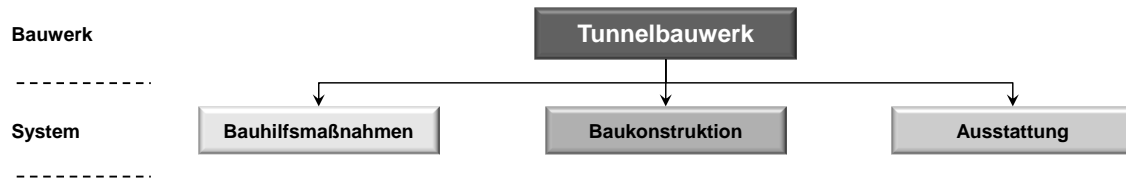


Abbildung 6.3: Strukturebene 2 – Systemebene

6.1.3 Strukturebene 3: Baugruppe

Zur Umsetzung einer modularen Struktur ist die Einführung einer Sub-Systemebene erforderlich. Dazu sind die einzelnen Module in Systemeinheiten gleicher Funktion, Aufgabe bzw. Struktur zusammenzufassen. Ziel ist eine gezielte Aggregation von Modulen hinsichtlich gleicher Baugruppen und deren Aufgabenspektren. Wesentlich für die Identifikation der Baugruppen ist die übergeordnete Aufgabe, die zur Herstellung sowie dem dauerhaften und sicheren Betrieb des Bauwerkes notwendig wird. Die Aufgaben leiten sich aus den in den allgemeingültigen Regelwerken (ZTV-ING – Teil 5³⁹² und RABT 2006³⁹³) formulierten Anforderungen ab. Weitere Ansätze sind der Gruppeneinteilung der RAB-ING zur Kostenberechnung entnommen.³⁹⁴

An dieser Stelle soll eine grundlegende Struktur und Systematik entwickelt werden. Dabei wird das Modell in der Form konzipiert, dass neue Bestandteile – abhängig von dem Untersuchungsgegenstand bzw. des technischen und normativen Entwicklungsstands – integriert werden können. Die vorgenommene Klassifizierung (Tabelle 6.1) kann deshalb auch nicht abschließend erfolgen. Vielmehr stellt diese eine offene Systematik dar, die, wie in Abs. 2.3 gefordert, je nach Aufgabenstellung angepasst und erweitert werden kann.

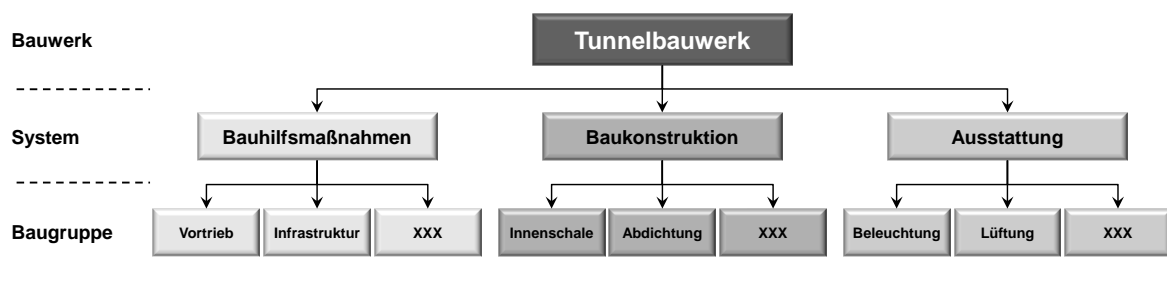


Abbildung 6.4: Strukturebene 3 – Baugruppen-Ebene

³⁹² vgl. BAST (2012)

³⁹³ vgl. BAST (2006)

³⁹⁴ vgl. BMVBW (1995), Anhang 2

Tabelle 6.1: Zuweisung Aufgaben und Baugruppen

System	Aufgabe	Baugruppe
Bauhilfsmaßn.	Erstellung des Bauwerkes	Vortrieb / Aushub
	Unterstützung der Bauarbeiten	Infrastruktur
Baukonstruktion	Dauerhaft abdichtende Funktion	Abdichtung
	Statische und gestalterische Funktion im Tunnel	Innenschale
	Statische und gestalterische Funktion in vorgelagerten Bereichen	Portal
	Wasserhaltung außerhalb des Bauwerkes	Grundwasserhaltung
	Wasserhaltung innerhalb des Bauwerkes	Entwässerung
	Aufnahme und Leitung von Verkehrsströmen	Verkehrswege
	Abführung von schädlichen Gasen / Frischluftzufuhr	Lüftungsbauwerk
	Aufnahme von Betriebstechnik	Betriebsbauwerk
Ausstattung	Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse	Beleuchtungsanlage
	Sicherstellung schadfreier Luft- und ausreichender Sichtverhältnisse	Lüftungsanlage
	Gewährleistung eines sicheren Verkehrsablaufes	Verkehrstechnik
	Unterstützung von Nutzern und Rettungskräften in Notfallsituationen	Sicherheitstechnik
	Versorgung, Überwachung, Steuerung	Zentrale Anlagen

6.1.4 Strukturebene 4: Modulebene

In der weitergehenden Strukturierung erfolgt die für das Modell wesentliche Bildung von Modulen. Die Definition der einzelnen Module basiert, ausgehend von der Baugruppe, auf der zu erfüllenden Aufgabe. Die wesentlichen Kriterien zur Abgrenzung der Module sind neben der eigenständigen Aufgabenerfüllung (funktionale Unabhängigkeit) die Anforderungen an die physische Unabhängigkeit und die Integrität (Abs. 5.3.2).

Die Unabhängigkeit ist dadurch gekennzeichnet, dass keine bzw. sehr schwach ausgeprägte Beziehungen zu anderen Modulen vorliegen. Ein Modul kann somit als relativ autonomes Sub-System betrachtet werden, das die ihm angedachten Aufgaben selbständig (abgesehen von Steuerung und Stromversorgung) erfüllen kann (funktionale Unabhängigkeit).³⁹⁵ Eine physische Unabhängigkeit liegt vor, wenn die einzelnen Module gegenständig gefügt bzw. getrennt werden können.³⁹⁶ Innerhalb eines Moduls, zwischen den Bestandteilen oder Elementen, können die beiden Formen der Wechselwirkungen (physisch und funktional) in sehr dominanter Ausprägung vorkommen.

Die Integrität wird dadurch gewährleistet, dass die zur Aufgabenerfüllung notwendigen Bestandteile (Elemente) vollumfänglich im Modul eingebunden sind. Im erweiterten Blick auf den Untersuchungsrahmen ist die Integrität dadurch sicherzustellen, dass alle erforderlichen Module und die dabei relevanten Elemente einbezogen werden.

³⁹⁵ vgl. GÖPFERT (1998), S. 27 ff.

³⁹⁶ vgl. GÖPFERT (1998), S. 106

Die Module beinhalten alle Elemente, Leistungen und Kosten, die zur Herstellung und den Betrieb erforderlich sind (z. B. Planung, Bewehrung, Schalung, Betonage, Reinigung und Instandsetzung der Tunnelwände).³⁹⁷

Der modulare Aufbau garantiert eine baukastenartige Zusammenstellung des Untersuchungsrahmens, eine Anpassungsfähigkeit an den Planungsstand sowie die Umsetzung der angestrebten Flexibilität, z. B. durch Austausch alternativer Module. Die vorhandenen externen Beziehungen gilt es dabei zu berücksichtigen (vgl. Abs. 5.3.2).

Das an dieser Stelle verfolgte Ziel umfasst die Entwicklung eines allgemeingültigen Modells und dessen Strukturierung. Eine abschließende Erfassung einer vollständigen Ausgestaltung mit allen Modulen ist nicht notwendig und zielführend. Stattdessen wird in Abs. 6.2 die zugehörige Vorgehensweise zur Bildung von Modulen sowie deren Ausgestaltung vorgestellt. Abbildung 6.5 zeigt eine erste, beispielhafte Einteilung, inwieweit eine Strukturierung vorgenommen werden kann.

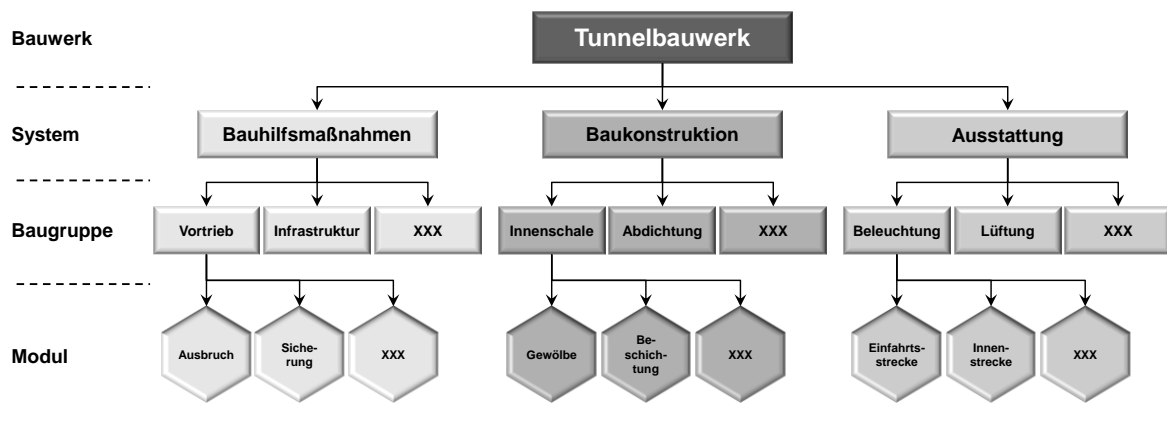


Abbildung 6.5: Strukturebene 4 – Modulebene

6.1.5 Strukturebene 5: Elementebene

Die abschließende Hierarchieebene umfasst die einzelnen Bestandteile aus denen sich die Module zusammensetzen. Beispielhaft beinhaltet das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“ die Elemente: Leuchte, Leuchtmittel, Kabel, Steuerung und Sensorik.

Aufgrund der zum Teil sehr starken internen Beziehungen ist eine Differenzierung bis in die Elementebene mit sehr hohem Aufwand verbunden. Die daraus resultierende ausgeprägte Detailtiefe erlaubt unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten keine sinnvolle Bestimmung der für eine Optimierung notwendigen Daten. Für das vorgestellte Modell wird der Einsatz der Elemente auf die Bestimmung der Kosten und Leistungen der einzelnen Module sowie auf den Nachweis der Integrität beschränkt. Eine Erweiterung der Systemstruktur ist allerdings aufgrund der hierarchisch-modularen Strukturierung jederzeit möglich.

³⁹⁷ Hierzu werden übergeordnete, allgemeingültige Prozesse für die Module definiert (Abs. 6.3).

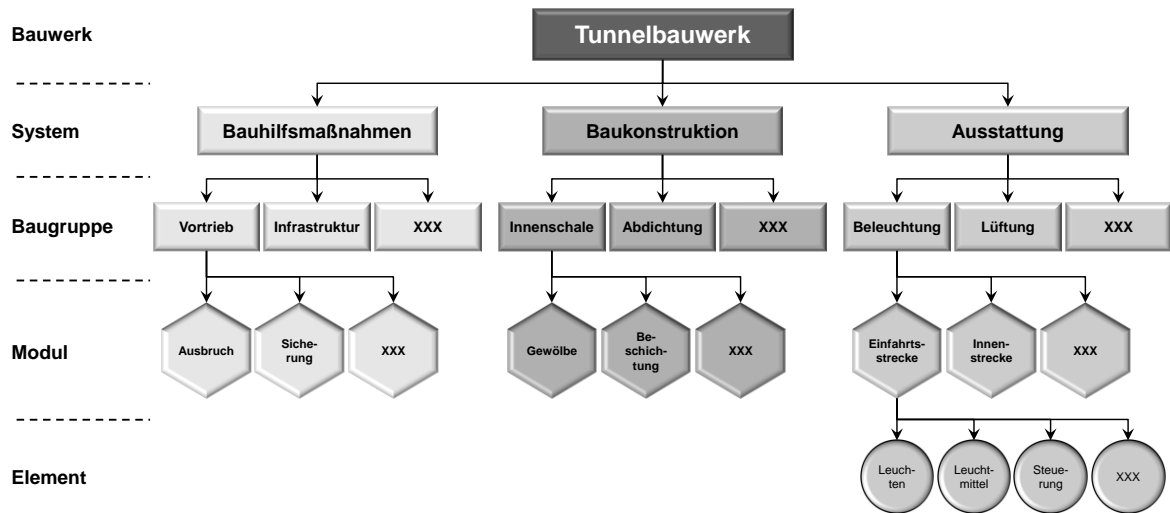


Abbildung 6.6: Strukturebene 5 – Elementebene

6.2 Module von Tunnelbauwerken

Die modulare Zusammenstellung des Untersuchungsgegenstandes bildet die Basis zur Bestimmung der Lebenszykluskosten und deren angestrebter Optimierung. Die Module repräsentieren die wesentlichen, eigenständigen Bestandteile des Gesamtsystems bzw. des jeweiligen Untersuchungsrahmens. Voraussetzung ist, dass die Module weitgehend entkoppelt sind. Die Einteilung orientiert sich an der technisch-funktionalen Aufgabe, die dem jeweiligen Modul zugeordnet werden kann. Durch die nicht bzw. nur schwach ausgebildeten Beziehungen untereinander besteht der Vorteil, einzelne Module den Anforderungen bzw. dem vorliegenden Wissensstand anzupassen, ohne dabei die Gesamtstruktur verändern zu müssen (Abbildung 6.7). Die Komplexität des Gesamtsystems lässt sich dadurch reduzieren. Aufgrund ihrer Eigenständigkeit sind die Module austauschbar, veränderbar und übertragbar und können unabhängig voneinander entwickelt werden. Der modulare Charakter erlaubt eine Untersuchung auch nur einzelner Module, wobei die vorhandenen Beziehungen (Schnittstellen) zu anderen Modulen Beachtung finden müssen.

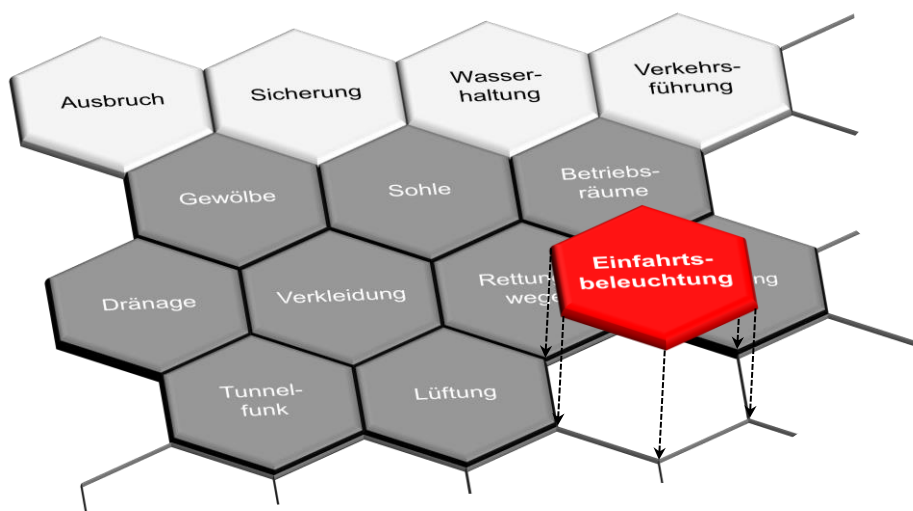


Abbildung 6.7: Modulare Struktur für die Lebenszykluskostenrechnung von Tunnelbauwerken

6.2.1 Vorgehensweise zur Bestimmung von Modulen

Die Bestimmung der Module und deren Attribute ist der wesentliche Schritt zur Ausgestaltung des Modulare Prozessmodells. Für die Definition der Module entscheidend ist die technisch-funktionale Aufgabe, die durch das Modul erfüllt werden soll. Weitere Kriterien umfassen die verfolgte Zielstellung, den gewählten Untersuchungsrahmen sowie die vorliegende Informationsdichte. Dabei gilt, die Module möglichst allgemeingültig zu definieren, so dass eine Übertragbarkeit auf bzw. eine Vergleichbarkeit mit anderen Projekten gewährleistet werden kann. Als Zielstellungen für die Definition sind die Anforderungen an Unabhängigkeit und Integrität sowie eine eigenständige Aufgabenerfüllung umzusetzen (Abbildung 6.8). Entsprechend der Forderung von HEINRICH hat dabei ein Modul eine möglichst abgegrenzte Aufgabe zu erfüllen.³⁹⁸

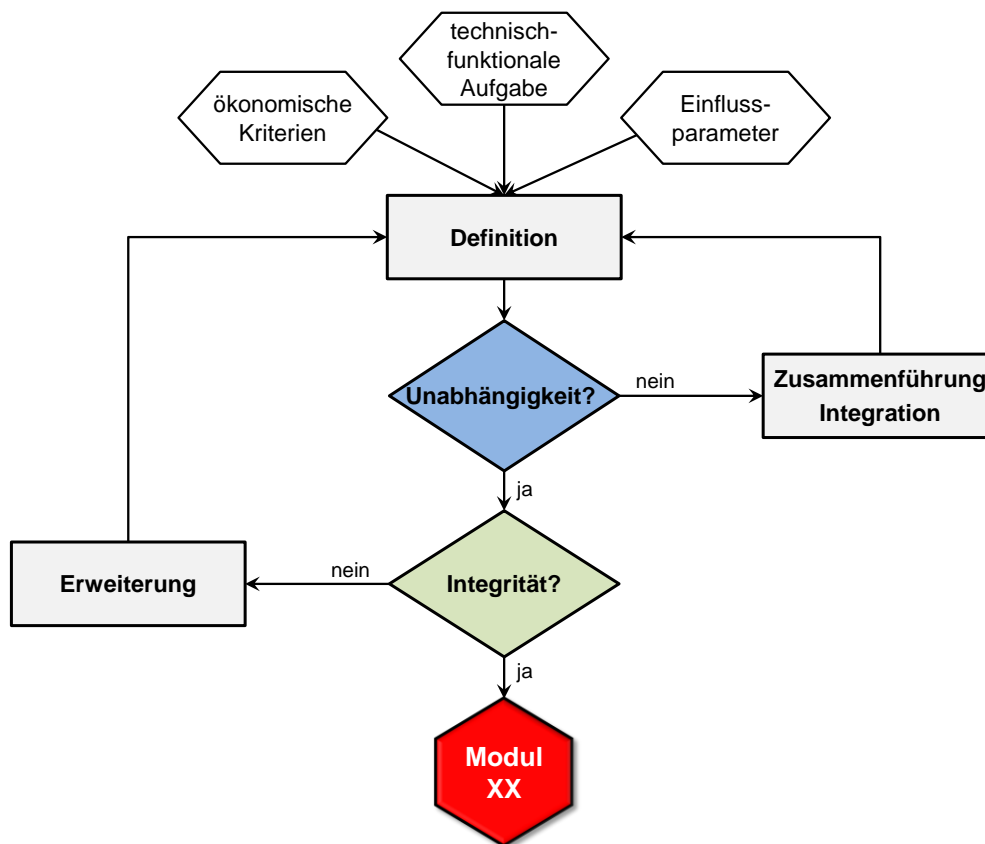


Abbildung 6.8: Vorgehensweise zur Bestimmung von Modulen

6.2.1.1 Definition

Die Definition des Moduls erfolgt ausgehend von der zu erfüllenden, technisch-funktionalen Aufgabe. Abgesehen von einer Energieversorgung bzw. übergeordneten Steuerung, ist diese Aufgabe durch das Modul eigenständig zu erbringen. Weitere Kriterien, die zur Bildung von Modulen herangezogen werden können, liegen in deren wirtschaftlicher Bedeutung oder der notwendigen Differenzierbarkeit, die für eine Übertragbarkeit auf andere Projekte erforderlich sind. Insbesondere die maßgebenden Einflussparameter können ausschlaggebend dafür sein, dass eine Trennung verschiedener Bauteile des gleichen Aufgabenspektrums (Bauteilgruppe) erforderlich wird.

³⁹⁸ vgl. HEINRICH (1994), S. 255

Beispielsweise ist die Tunnelbeleuchtung hinsichtlich Einfahrtsbeleuchtung und Innenbeleuchtung zu differenzieren. Grundsätzlich übernehmen beide Module die Aufgabe der Sicherstellung ausreichender Sichtverhältnisse.³⁹⁹ Im Bereich der Tunneleinfahrt ist dies jedoch mit weitaus größerem Aufwand verbunden, da sich das menschliche Auge nur sehr langsam an die dunklere Umgebung im Tunnel anpassen kann.⁴⁰⁰ Um diesen Umstand abzdämpfen, ist im Einfahrtsbereich eine spezielle Adaptionsbeleuchtung mit einer vergleichsweise hohen Leuchtdichte vorzusehen (Abbildung 6.9). Es gilt, das menschliche Auge vom taghellen Bereich vor dem Tunnel an das dunklere Umfeld im Tunnel heranzuführen, ohne das Sicherheitsniveau negativ zu beeinflussen. Maßgebender Faktor zur Bestimmung der notwendigen Leuchtdichte ist, neben der Beleuchtungsklasse, die Leuchtdichte in der Annäherungsstrecke.⁴⁰¹

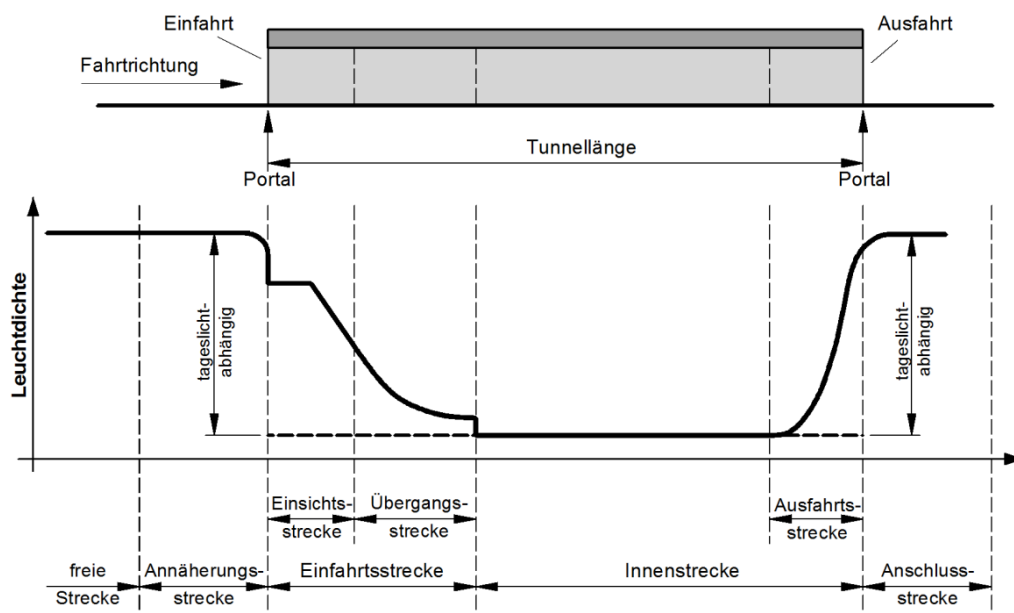


Abbildung 6.9: Schematischer Leuchtdichteverlauf für Straßentunnel⁴⁰²

Im Tunnelinneren ist durch die bereits erfolgte Adaption des Auges eine vergleichsweise geringere Leuchtdichte zur Ausleuchtung der Fahrstrecke erforderlich (Abbildung 6.9). Diese ist lediglich von der Beleuchtungsklasse abhängig und steht in keiner Beziehung zur Leuchtdichte in der Annäherungsstrecke. Die über den Tagesverlauf veränderliche Leuchtdichte im Außenbereich (Sonnenstand, Bewölkung, Jahreszeit usw.) macht eine permanente Anpassung der Ausleuchtung im Einfahrtsbereich notwendig, während in der Innenstrecke im Regelfall die Leuchtdichte auf konstantem Niveau verbleibt.⁴⁰³ Aufgrund des sehr unterschiedlichen Energiebedarfs und den abweichenden Einflussparametern ist bei der Modulbildung eine Differenzierung zwischen der Beleuchtung der Einfahrtsstrecke und der Tunnelinnenstrecke vorzunehmen.

³⁹⁹ vgl. FGSV (2006), S. 15

⁴⁰⁰ vgl. TROTTER (1995), S. 104 f.

⁴⁰¹ vgl. FGSV (2006), S. 16; DIN 67524-1 (2008), S. 16

⁴⁰² in Anlehnung an FGSV (2006), S. 51

⁴⁰³ vgl. DIN 67524-1 (2008), S. 26

6.2.1.2 Nachweis der Unabhängigkeit

Zum Nachweis der Unabhängigkeit der definierten Module ist sowohl die funktionale als auch die physische Ebene der Unabhängigkeit eingehend zu prüfen (Abbildung 6.8).

Von einer **funktionalen Unabhängigkeit** ist auszugehen, sofern das Modul die ihm angedachte Aufgabe eigenständig erfüllen kann.⁴⁰⁴ Die Stromversorgung sowie eine mögliche übergeordnete Steuerung sind dabei auszuklammern.

Eine **physische Unabhängigkeit** ist dadurch gekennzeichnet, dass Module gegenständlich ffügbar bzw. trennbar sind, ohne dabei die Funktionsfähigkeit des jeweils anderen negativ zu beeinflussen.⁴⁰⁵

Ziel muss es sein, Module als ausgeprägt autonome Sub-Systeme zu generieren. Mögliche Wechselwirkungen mit andern Modulen sind dabei auf ein Minimum zu reduzieren. Nur so lassen sich die gestellten Anforderungen hinsichtlich einer offenen Systematik – mit Austauschbarkeit, Wiederverwendbarkeit sowie Anpassungsfähigkeit und Erweiterbarkeit des Untersuchungsrahmens – konsequent umsetzen. Innerhalb der Module ist der Grad der Unabhängigkeit von untergeordneter Bedeutung.

Sind die beiden Ausprägungen der Unabhängigkeit nicht im ausreichenden Maße nachzuweisen, ist die Integration weiterer Elemente oder eine Zusammenführung mit anderen Modulen vorzunehmen. Umgekehrt kann auch eine Reduzierung des Modulumfangs notwendig werden. Grundsätzlich hat eine erneute Definition des Moduls und dessen Ausgestaltung zu erfolgen (Abbildung 6.8).

Für das Beispiel der Module für die Einfahrts- und Innenbeleuchtung lassen sich die beiden Unabhängigkeitsdimensionen dadurch nachweisen, dass beide Systeme getrennt voneinander betrieben und geregelt werden. Sowohl Steuerung als auch Aufgabe differieren und stellen die funktionale Unabhängigkeit sicher. Durch die Ausgestaltung mit den notwendigen Komponenten für den eigenständigen Betrieb und der lösbaren Verbindung, beispielsweise in Bezug zur Tunnelinnenschale, ist auch die Anforderung an die physische Unabhängigkeit erfüllt.

Bei der Bestimmung der Unabhängigkeit ist allerdings einzubeziehen, dass eine gegenseitige Beeinflussung der Module möglich sein kann. Das heißt, dass Unabhängigkeit nicht bedeutet, dass keine Interdependenzen vorliegen. So ist im Beispiel der Tunnelbeleuchtung die physische und technische Unabhängigkeit nachgewiesen. Allerdings bedingt beispielsweise die notwendige Leuchtdichte der Innenstrecke die Länge der Einfahrtsstrecke.⁴⁰⁶ Diese Schnittstellen gilt es für eine gezielte Optimierung zu erfassen und in den Modulen und damit im Modell zu integrieren (Abs. 6.2.3.6).

6.2.1.3 Nachweis der Integrität

Die Integrität beschreibt die Eigenschaft, einzelne Elemente zu einem Modul bzw. einzelne Module zu einem vollständigen Untersuchungsrahmen aggregieren zu können.⁴⁰⁷ Für den Nachweis auf Modulebene ist dabei zu prüfen, ob mit den einbezogenen Bestandteilen, die volle Funktionsfähigkeit erzielt werden kann, so dass alle Elemente vollumfänglich im Modul implementiert sind. In Bezug auf den Untersuchungsrahmen hat der Nachweis dahingehend zu erfolgen, dass die einbezogenen Module mit den zugehörigen Elemen-

⁴⁰⁴ vgl. GÖPFERT, STEINBRECHER (2000), S. 22

⁴⁰⁵ vgl. GÖPFERT (1998), S. 106

⁴⁰⁶ vgl. FGSV (2006), S. 17

⁴⁰⁷ vgl. BERNARDS (2005), S. 76

ten, den Untersuchungsgegenstand vollständig abbilden und zu einem Ganzen zusammengeführt werden können.⁴⁰⁸ Ist der Nachweis der Integrität – unabhängig von der Strukturebene – nicht erfüllbar, hat eine Erweiterung des jeweiligen Moduls bzw. Ergänzung um die noch fehlenden Bestandteile zu erfolgen (Abbildung 6.8).

Die verwendeten Elemente, sowohl für das Modul der Einfahrts- als auch der Innenbeleuchtung, umfassen die Leuchten, Leuchtmittel, Kabel, Sensoren und Steuerung, so dass eine eigenständige Funktionserfüllung (abgesehen von der Stromversorgung) gewährleistet ist. Die Integrität auf Modulebene ist gegeben. Beschränkt sich der Untersuchungsrahmen auf die Tunnelbeleuchtung, wäre zu prüfen, ob für den Ausfahrtsbereich eine eigenständige Beleuchtung vorzusehen ist. Bei Bedarf wäre das Modul „Ausfahrtsbeleuchtung“ zu ergänzen. Für einen weitergehenden Untersuchungsrahmen sind die entsprechenden Module einzubeziehen und die Prüfung zu erweitern.

Mit dem Nachweis der Integrität ist die Bestimmung von eigenständigen Modulen abgeschlossen. In den weiteren Schritten sind die für die Gesamtkostenoptimierung erforderlichen Attribute projektbezogen zu erfassen (Abs. 6.2.3).

6.2.2 Beispielhafte Systemausgestaltung für das Modulare Prozessmodell

Eine systematische Aufbereitung und allgemeingültige Zusammenstellung der verwendeten Elemente für Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur existiert bislang nicht. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um die Entwicklung einer grundlegenden Systematik. Das dabei entstehende Lebenszykluskostenmodell stellt nur eine exemplarische Strukturierung und Ausgestaltung dar. Vielmehr ist die entwickelte Modellstruktur und die vorgestellte Vorgehensweise die Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung von Modulen und Prozessen, die aufgrund der modularen Struktur und Erweiterbarkeit des Modells bausteinartig eingefügt werden können. Abhängig vom zu untersuchenden Projekt ist dadurch das Modell flexibel auszugestalten und an die verfolgte Zielstellung anzupassen.

Zukünftig könnte ein „Modulkatalog“, in dem vollständig ausgearbeitete Module zusammengestellt sind, die Anwendung des Modells unterstützen. Eine Anpassungsfähigkeit an die jeweilige Aufgabenstellung ist dabei Grundvoraussetzung. Schließlich wird die Struktur und Ausgestaltung der Module wesentlich durch die Projektausprägung und die Zielstellung beeinflusst.

In Abbildung 6.10 wurde eine modulare Strukturierung von Tunnelbauwerken exemplarisch vorgenommen. Grundlage der Ausgestaltung bilden die ZTV-ING⁴⁰⁹, die RABT⁴¹⁰ sowie das Handbuch des Tunnelbaus⁴¹¹. Für die spätere Anwendung ist das Modell projektspezifisch bzw. auf die Zielstellung ausgerichtet auszugestalten.⁴¹²

⁴⁰⁸ vgl. BALDWIN, CLARK (1998), S. 39

⁴⁰⁹ BAST (2012)

⁴¹⁰ FGSV (2006)

⁴¹¹ MAIDL (1994); MAIDL (1995); MAIDL, THEWES, MAIDL (2014)A; MAIDL, THEWES, MAIDL (2014)B

⁴¹² Eine beispielhafte Ausgestaltung wurde in Abs. 10 an einem abgegrenzten Untersuchungsrahmen vorgenommen

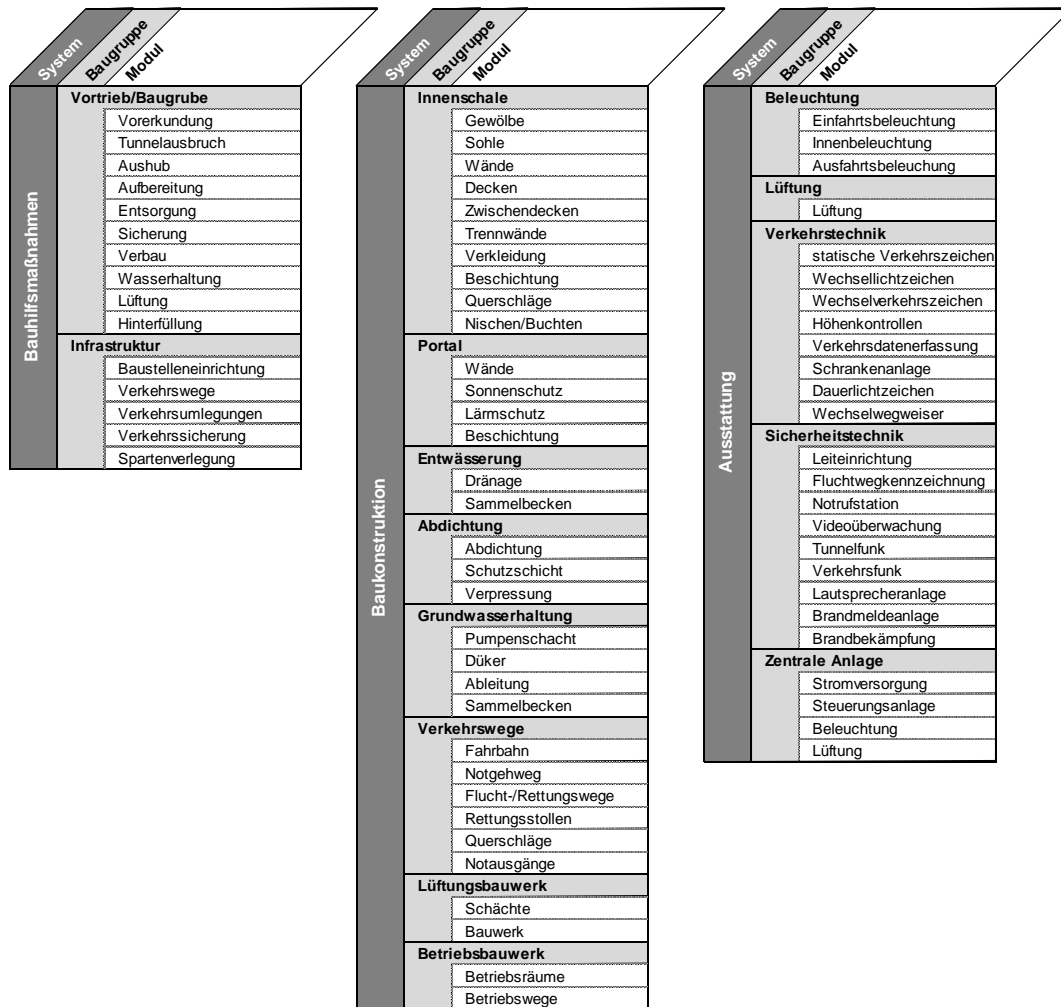


Abbildung 6.10: Exemplarische Strukturierung und Moduleinteilung für Straßentunnel

6.2.3 Modulaufbau (Grundmodul)

Zur Gewährleistung einer Integrierbarkeit sowie Wiederverwendbarkeit werden an die Module spezielle formelle Anforderungen gestellt. Hierfür ist im Besonderen für die interne Struktur der Module ein allgemeingültiger Aufbau zu formulieren. Gleichzeitig gilt es die externen Schnittstellen zu anderen Modulen vollumfänglich abzubilden. Gerichtet auf die Zielstellung einer Optimierung der Lebenszykluskosten sind dazu die nachfolgenden Bestandteile für die einzelnen Module zu erarbeiten (Abbildung 6.11).

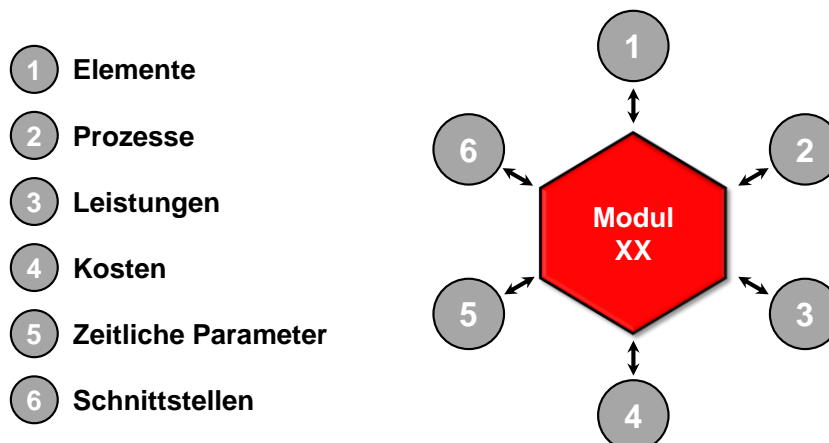


Abbildung 6.11: Interne Struktur eines Moduls

6.2.3.1 Elemente

Die wesentlichen Bestandteile (Elemente) des Moduls sind zu erfassen und gegenüber anderen Modulen eindeutig abzugrenzen. Dabei sind alle Komponenten mit einer gemeinsamen technisch-funktionalen Aufgabe⁴¹³ zusammenzufassen. Sollte ein Element für mehrere Aufgaben vorgesehen sein, ist die vorwiegende Aufgabe entscheidend für die Modulzuordnung (Abbildung 6.12). Durch die im Zuge der Moduldefinition durchgeführte Integritäts- und Unabhängigkeitsprüfung ist der Nachweis über Vollständigkeit bereits erbracht.⁴¹⁴

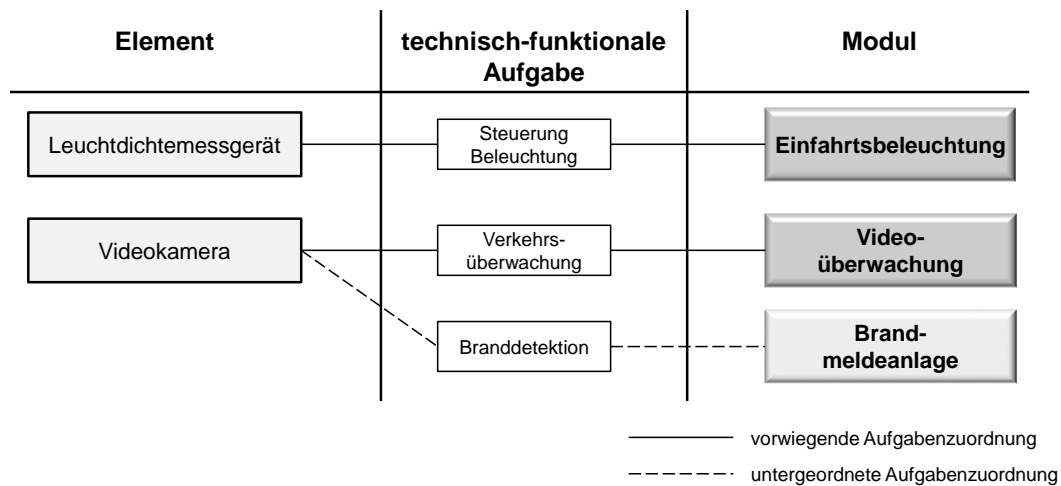


Abbildung 6.12: Zuordnung Element – Modul mit Hilfe der technisch-funktionalen Aufgabe

Zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit bzw. Übertragbarkeit hat eine exakte Erfassung und Spezifizierung der einzelnen Elemente zu erfolgen. Beispielsweise ist für die Beleuchtung zwischen den verwendeten Leuchtmitteln (Leuchtstoffröhren, Natriumdampf-Hochdrucklampen oder LED-Leuchtmittel) zu differenzieren. Entsprechendes gilt auch für Leuchten, Sensorik, Regelung usw. Um den Aufwand zur Datenerhebung zu beschränken, kann die Differenzierung auf die die Folgekosten maßgeblich beeinflussenden Elemente eingegrenzt werden.

6.2.3.2 Prozesse

Die einzelnen Module durchlaufen über die gesamte Lebensdauer eine Vielzahl an unterschiedlichen Prozessen. Zur gezielten Strukturierung und Vergleichbarkeit werden in Abs. 6.3 die grundsätzlichen Prozesse im Lebenszyklus eines Straßentunnels identifiziert. Für jedes Modul sind die relevanten Prozesse zu bestimmen und in Umfang und Häufigkeit der jeweiligen Lebensphase zuzuordnen (Abbildung 6.13). Die dabei anfallenden Leistungen sowie die daraus resultierenden Kosten sind nachfolgend prozessbezogen zu erfassen. Die Prozesse bilden dabei nicht den gesamten Lebenszyklus als Prozesskette ab. Vielmehr beschränken sich diese auf die Teilschritte, in denen Leistungen und daraus resultierend Aufwendungen anfallen.

⁴¹³ Bei BLEES als „Modultreiberausprägung“ definiert. [BLEES (2011), S. 88 ff.]

⁴¹⁴ Zur Definition von Modulen siehe Abs. 6.2.1.

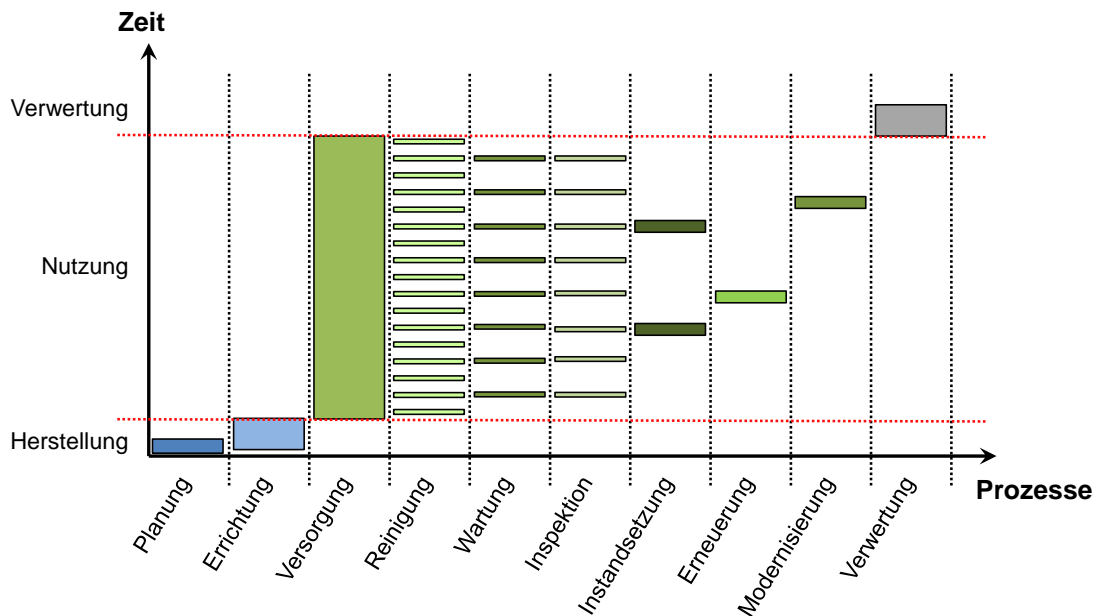


Abbildung 6.13: Identifikation der Prozesse im Lebenszyklus eines Moduls

6.2.3.3 Leistungen

Per Definition hat ein Prozess immer eine Veränderung eines Systems vom Anfangs- zum Endzustand zur Folge.⁴¹⁵ Für diese Systemänderung muss eine Leistung erbracht werden, die letztlich den Aufwendungen, respektive Kosten, gegenüber steht.⁴¹⁶ In der Literatur – besonders im Bereich der Bauwirtschaft – ist der Begriff „Leistung“ mit zwei unterschiedlichen Definitionen belegt: mechanische Leistung und baubetriebswirtschaftliche Leistung.

Die **mechanische Leistung** ist das Verhältnis von zu verrichtender Arbeit und der dafür erforderlichen zeitlichen Aufwendungen. Die **baubetriebswirtschaftliche Leistung** entspricht dem Produkt aus Leistungsmenge und Einheitspreis. Hier ist die Leistungsmenge als Ergebnis eines Produktionsprozesses zu verstehen.⁴¹⁷

Im Zuge dieser Arbeit wird unter dem Begriff „Leistung“ die mechanische Leistung vergleichbar zu den Begriffen „Tätigkeit“ bzw. „Maßnahme“ verstanden. Die Bestimmung der Leistung ist für eine gezielte Ermittlung der Kosten sowie zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit und Nachvollziehbarkeit vorzunehmen. Dazu notwendig ist eine möglichst exakte Abgrenzung für das jeweilige Modul.

Zur Bestimmung der notwendigen Leistungen und dessen Umfang kann auf unterschiedliche Quellen zurückgegriffen werden, beispielsweise

- Standardleistungsbuch (STLB-Bau),
- Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT),
- Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen,
- Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT),
- Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken (RI-ERH-ING),
- ZTV-ING, RiL 853, ABBV, RWVZ, RWVA, DIN 1076 usw.

⁴¹⁵ vgl. DIN 18709-5 (2010), S. 4

⁴¹⁶ vgl. EN ISO 9000 (2005), S. 8

⁴¹⁷ vgl. LEIMBÖCK, KLAUS, HÖLKERMANN (2009), S. 2

Ergänzend kann die erforderliche Leistung aufgrund von Planungen, Erfahrungen oder auch durch Herstellerangaben bestimmt werden. Wesentlich dabei ist es, die Leistungsinhalte und den Umfang eindeutig zu erfassen und abzugrenzen.

6.2.3.4 Kosten

Den zu erbringenden Leistungen – zugeordnet zu den einzelnen Prozessen – sind Kosten gegenüberzustellen.⁴¹⁸ Abhängig vom Planungs- und Informationsstand können die Kosten in unterschiedlicher Form erhoben werden. Dabei kann auf verschiedene Möglichkeiten der Kostenplanung zurückgegriffen werden:

- Verfahren zur Kostenschätzung (Expertenschätzung)
- kennzahlenorientierte Verfahren (vergangenheitsbasierenden Daten, Benchmarks)
- wertorientierte Verfahren (%-Satz der Investitionskosten)
- analytische Verfahren (PABI-Verfahren⁴¹⁹)
- kalkulatorische Verfahren (Umlagekalkulation, Zuschlagskalkulation)

Die Kosten für eine Leistung sind stark von der Marktsituation abhängig und können dadurch mehr oder weniger starken Schwankungen unterworfen sein. Ein vollkommener Markt, worauf sich die Marktwirtschaft begründet, ist von theoretischer Natur. Diese „Marktunvollkommenheit“⁴²⁰ verzerrt die Preise und damit letztlich auch die Kosten. MÜHLENKAMP schlägt ersatzweise vor, sogenannte „Schattenpreise“ zu bestimmen, die die „wahren gesellschaftlichen Grenzkosten“ widerspiegeln.⁴²¹ Zur Kostenermittlung ist deshalb auf möglichst realitätsnahe Werte zurückzugreifen. Dazu gehört auch eine Berücksichtigung aktueller, vergangener bzw. zukünftiger Marktsituationen.

Die Genauigkeit bei der Bestimmung der Kosten steigt, sofern die gesuchte Größe über die einzelnen Faktoren und nicht direkt bestimmt wird.⁴²² Gleichzeitig werden die Nachvollziehbarkeit und die Möglichkeiten zur aktiven Optimierung der Kosten erhöht.

Die Kosten sind aus Gründen der Einheitlichkeit als Nettobeträge – ohne Mehrwert- bzw. Umsatzsteuer – zu bestimmen. Dadurch entfällt eine notwendige Umrechnung bei Veränderungen der Steuersätze, was eine Vergleichbarkeit der Kostengrößen gewährleistet.

Bei Kostenplanungen, die auf bereits realisierten Projekten basieren, ist sicherzustellen, dass die verwendeten Kosten über einen gemeinsamen zeitlichen Bezugspunkt verfügen. Andernfalls ist eine Umrechnung, z. B. mit Hilfe von Preisindizes, vorzunehmen.⁴²³ Zukünftige Kostenentwicklungen sind ebenfalls über Preisindizes oder ähnliche Entwicklungsprognosen abzuschätzen und in der Bestimmung zukünftiger Kosten einzubeziehen.

Können identifizierte Kosten einem Prozess eines Moduls nicht direkt zugeordnet werden, beispielsweise bei gemeinsamer Kostenerfassung von Wartung und Reinigung, so hat eine Bestimmung des maßgebenden Prozesses und eine entsprechende Kostenzuweisung

⁴¹⁸ An dieser Stelle sei auf die Begriffsdefinition „Kosten“ unter Abs. 3.1.3.1 verwiesen.

⁴¹⁹ siehe hierzu BAHR (2008)

⁴²⁰ HANUSCH (1994), S. 58

⁴²¹ MÜHLENKAMP (1994), S. 133

Marktpreise entsprechen Schattenpreisen, die durch äußere Rahmenbedingungen, wie z. B. Monopole, Subventionen, Steuern beeinflusst sind.

⁴²² Vergleichbar mit der Vorgehensweise bei einer Kalkulation einzelner Leistungen und den daraus resultierenden Gesamtkosten. [vgl. FABRYCKY, BLANCHARD (1991), S. 159]

⁴²³ Hierzu kann auf verschiedene Indexreihen, beispielsweise des Statistischen Bundesamtes, zurückgegriffen werden (www.destatis.de).

zu erfolgen. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit ist dies zu dokumentieren. Bei übergeordneten Kosten, die keinem Modul direkt zugewiesen werden können, sind diese in der nächsthöheren Strukturebene zu berücksichtigen. Sofern auch auf der Bauteil- oder Systemebene keine Kostendifferenzierung vorgenommen werden kann, hat eine übergeordnete Zuweisung auf Bauwerksebene zu erfolgen.

Der Lebenszykluskostenrechnung liegt die Grundidee der Optimierung der Gesamtkosten aus Erst- und Folgekosten eines Systems zugrunde.⁴²⁴ Dahinter steht der Leitgedanke des ökonomischen Prinzips mit einer Zielerreichung durch einen möglichst geringen Mitteleinsatz (Minimalprinzip).⁴²⁵ Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll an dieser Philosophie nichts verändert werden und einzig die Kosten einer eingehenden Betrachtung zugeführt werden. Eine Einbeziehung von Erlösung kann dabei durch Erweiterung des Untersuchungsrahmens erfolgen. Die grundlegende Systematik des Modells bleibt dabei unverändert. Es ist vorab lediglich eine eindeutige und stringente Zuweisung der Vorzeichen für Kosten bzw. Erlöse vorzunehmen.

6.2.3.5 Zeitliche Parameter

Der Wert einer monetären Größe ist vom Anfallszeitpunkt geprägt. Die Vergleichbarkeit und Aufsummierung monetärer Größen bei der Lebenszykluskostenrechnung bedürfen aus diesem Grund der Berücksichtigung zeitlicher Einflüsse zur Wertanpassung.⁴²⁶ Hierdurch ist es erforderlich, neben der Häufigkeit auch die jeweiligen Zeitpunkte zu berücksichtigen, an denen die Leistungen, respektive die Kosten, für die einzelnen Prozesse anfallen. Beispielsweise sind unter Zuhilfenahme der Nutzungsdauern, die Zeitpunkte abzuschätzen, an denen einzelne Module ausgetauscht werden und daraus resultierend Erneuerungskosten zu berücksichtigen sind.

Neben der Nutzungsdauer sind hierzu die Anfallszeitpunkte sowie Dauern der einzelnen Prozesse über den gesamten Lebenszyklus bzw. dem Betrachtungszeitraum zu bestimmen. Für zyklische Prozesse, beispielsweise Reinigung oder Inspektion, sind die zeitlichen Parameter in vielen Fällen durch rechtliche oder betriebstechnische Vorgaben gesichert prognostizierbar.⁴²⁷ Komplexer ist die Bestimmung der Zeitpunkte von azyklischen Prozessen, z. B. für die Erneuerung bzw. die Modernisierung einzelner Bauteile. Dabei sind auch Kriterien hinsichtlich Sicherheit und Verfügbarkeit zur Bestimmung der Zeitpunkte, z. B. für den Austausch der Bauteile, einzubeziehen. Entsprechende Werte können anhand einschlägiger Literatur, durch (Experten-) Abschätzungen, Herstellerangaben oder statistischen Auswertungen dokumentierter Daten ermittelt werden. Beispielsweise stellt VOGT speziell für die Tunnelausstattung einen Ansatz auf Basis der Weibull-Verteilung vor, mit dessen Hilfe die voraussichtliche Nutzungsdauer – ausgehend von beobachteten Nutzungsdauern gleichartiger Bauteile – durch statistische Auswertung bestimmt werden kann.⁴²⁸

⁴²⁴ vgl. GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997), S. 902
siehe hierzu auch Abs. 3.1.5 – Grundlagen der Investitionsrechnung

⁴²⁵ vgl. WOLL (2003), S. 60

⁴²⁶ vgl. GÖTZE (2008), S. 67

⁴²⁷ Beispielsweise durch das Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT), die Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT), DIN 1076 usw.

⁴²⁸ vgl. VOGT (2012), S. 111 ff.; VOGT, ADDEN (2014), S. 537 ff.

6.2.3.6 Schnittstellen

Die Module sind nach Abs. 6.2.1.2 technisch und physisch unabhängig auszubilden. Das bedeutet allerdings nicht, dass die Module sich nicht gegenseitig beeinflussen. Zur Gewährleistung einer Übertragbarkeit und Austauschbarkeit sowie für eine aktive Gestaltung der Lebenszykluskosten sind die Beeinflussbarkeit der einzelnen Module und deren gegenseitige Wechselwirkungen im Modell zu integrieren.⁴²⁹ Hierfür sind die Schnittstellen zwischen den Modulen – aber auch innerhalb der einzelnen Module – und deren Ausprägung zu bestimmen. Der Grad der Beeinflussbarkeit dient als Grundlage für die Einschätzung der Relevanz der Schnittstellen. Zusätzlich sind die wesentlichen Einflussparameter zu erarbeiten. Nach Identifizierung und Bewertung sämtlicher Randbedingungen ergibt sich eine Vernetzung der einzelnen Module und Prozesse.

Mit der Kenntnis der gegenseitigen Beeinflussbarkeit anhand der Schnittstellen und der Einflussparameter werden eine gezielte Substitution und die damit angestrebte Optimierung der Lebenszykluskosten ermöglicht. Des Weiteren kann in Kenntnis der Schnittstellen, der Untersuchungsrahmen auf einzelne Module, bzw. unter Berücksichtigung davon wesentlich beeinflusster Module, beschränkt werden.⁴³⁰

6.3 Definition der Prozesse über den Lebenszyklus

Für das Tunnelbauwerk und die einzelnen Bestandteile ist über den gesamten Lebenszyklus eine Vielzahl an unterschiedlichen Leistungen – abhängig von der jeweiligen Lebensphase – zu erbringen. Art und Umfang der notwendigen Leistungen, aber auch deren Häufigkeit bzw. Dauer wird im Wesentlichen durch das Modul und dessen Funktion bestimmt.⁴³¹ Für eine allgemeingültige Strukturierung ist es erforderlich, die einzelnen Leistungen in übergeordnete Prozesse zusammenzufassen. Dabei sind die Prozesse in der Form zu definieren, dass eine Anwendbarkeit für alle Systemebenen – insbesondere für alle Module – gegeben ist.

Der Lebenszyklus der einzelnen Module und in Summe des gesamten Bauwerkes wird durch die Prozesse entscheidend geprägt. Sie stellen dadurch die zweite, wesentliche Säule im Modularen Prozessmodell dar.

Zur Bestimmung der Prozesse wird auf die in DIN EN ISO 9000 erfolgte Definition zurückgegriffen: Ein Prozess umfasst „(...) jede Tätigkeit oder jeden Satz von Tätigkeiten, die bzw. der Ressourcen verwendet, um Eingaben in Ergebnisse umzuwandeln (...)“.⁴³² Das bedeutet, dass alle Leistungen mit einem gemeinsamen Ergebnisziel zu einem Prozess zusammenzufassen sind. Die unterschiedliche Zielstellung, die mit den Maßnahmen während der einzelnen Lebensphasen verfolgt wird, bedingt eine erste Differenzierung hinsichtlich der Phasen Herstellung, Nutzung und Verwertung.

Für das weitere Vorgehen wird die in Abs. 3.1.2 vorgenommene Strukturierung der Lebenszyklusphasen (Abbildung 3.3) durch die Phasen- bzw. Prozesszuordnung erweitert (Abbildung 6.14).

⁴²⁹ vgl. ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 488; ENGELHARDT, SCHWARZ, THEWES (2014), S. 596 f.

⁴³⁰ Zur Verdeutlichung der Offenheit der Systematik wurde die Verifizierung von Modell und Methodik an einem abgegrenzten Untersuchungsrahmen vorgenommen (siehe Abs. 10).

⁴³¹ vgl. THEWES ET AL. (2013)A, S. 243

⁴³² DIN ISO 9000 (2005), S. 8

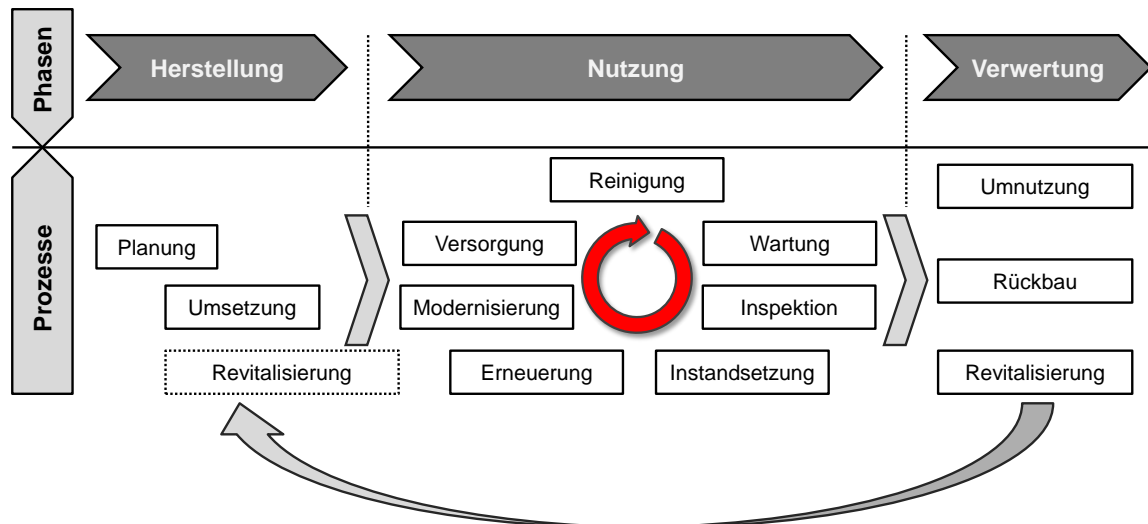


Abbildung 6.14: Prozesse während der Lebensphasen von Tunnelbauwerken⁴³³

Die nachfolgende Definition und Zusammenstellung der Prozesse, die über den Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes anfallen, erfolgt nicht abschließend. Gilt es weitere Leistungen und Kosten zu berücksichtigen, die keinem hier definierten Prozess zugeordnet werden können, sind eigenständige, möglichst allgemeingültige Prozesse zu generieren. Durch die Implementierung der neuen Prozesse ist das Modell an die jeweiligen Randbedingungen in Zielstellung und Betrachtungsgegenstand anzupassen.

6.3.1 Herstellungsphase

Für die Herstellungsphase sind die beiden Prozessschritte Planung und Umsetzung zu differenzieren. Eine entsprechende Unterteilung findet sich bereits in der Darstellung der Verfahrensebenen für den Verkehrswegebau.⁴³⁴

Planung lässt sich als „(...) gedankliche Vorwegnahme des zukünftigen Handelns (...)“ definieren.⁴³⁵ Der Planungsprozess ist somit der Umsetzung grundsätzlich vorgelagert. Eine teilweise Parallelität dieser beiden Prozesse ist besonders im Tunnelbau, bedingt durch Einbeziehung baubegleitender Untersuchungen im Zuge des Tunnelvortriebs, üblich.⁴³⁶

Die Umsetzung umfasst die Herstellung bzw. Montage des entsprechenden Moduls, so dass die damit vorgesehene Aufgabe vollumfänglich erbracht werden kann (Umsetzung der Planung). Die einzelnen Teilschritte für die Erstellung des Tunnelbauwerkes sind durch die Modularisierung bereits als eigenständige Module berücksichtigt.

6.3.1.1 Planung

Beim Prozess der Planung handelt es sich um die konkrete Planung des jeweiligen Moduls, die zu einer vertragsgemäßen Umsetzung erforderlich ist. Im Wesentlichen umfasst dies die Ausführungsplanung und die dabei anfallenden Leistungen. Sofern eine entsprechende Detaillierung bereits vorgenommen wurde, kann auch die Entwurfs- und Genehmigungsplanung einbezogen werden. Dies bedeutet, dass unter dem Prozess der Pla-

⁴³³ in Anlehnung an ENGELHARDT (2014), S. 552

⁴³⁴ vgl. BMVBS (2012), S. 10; siehe hierzu auch Tabelle 2.1 – Abs. 2.1.1

⁴³⁵ MÖLLER, KALUSCHE (2013), S. 95

⁴³⁶ vgl. NAUMANN, FRIEBEL (2000), S. 812; BAST (2012), Abschnitt 1, S. 5 f.

nung nicht der vollständige, stufenweise Planungsprozess – ausgehend von der Bedarfsplanung – zu verstehen ist (siehe hierzu Abs. 2.1.1). Die vorgelagerten Planungsphasen lassen sich, aufgrund des übergeordneten Charakters und der dadurch fehlenden Differenzierbarkeit einem einzelnen Modul nicht direkt zuordnen. Gleiches gilt für übergeordnete Leistungen, beispielsweise der Projektsteuerung oder der Planungskoordination. Durch die hierarchische Architektur des Modells sind diese nicht direkt zuordenbaren Kosten in einer höher gelegenen Strukturebene (Baugruppe, System oder Bauwerk) einzuordnen.

6.3.1.2 Umsetzung

Die Umsetzung ist durch die Errichtung bzw. Ausführung der zuvor geplanten Leistungen gekennzeichnet. In der vorliegenden Arbeit wird die Umsetzung als Prozess der gezielten Kombination von Produktionsfaktoren und deren Transformation in Erzeugnisse definiert.⁴³⁷ Dabei werden unterschiedliche Leistungen sowie Elemente in einen gemeinsamen Prozess zusammengefasst. Von Lieferung über Verarbeitung, Einbau und Nachbearbeitung, bis hin zu einem möglichen Rückbau für Provisorien umfasst der Prozess sämtliche Leistungsschritte, die zur Umsetzung des Moduls notwendig sind. Beispielsweise schließt der Umfang für die Errichtung einer Behelfsstraße neben Erdarbeiten auch die Herstellung des Straßenkörpers sowie den Rückbau nach Beendigung der Baumaßnahme ein.

6.3.2 Nutzungsphase

Während der Nutzungsphase, mit einer Dauer von rund 100 Jahren die zeitlich längste Phase im Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes, wird an das Bauwerk und dessen Ausstattung die Anforderung gestellt, dass zu jedem Zeitpunkt eine sichere Nutzung durch die Verkehrsteilnehmer gewährleistet werden kann. Dabei gilt es, kritische Situationen zu vermeiden und den Tunnelnutzer vor möglichen Gefahren zu schützen.⁴³⁸ Der jeweilige Straßenbaulastträger hat nach § 4 FStrG dafür Sorgen zu tragen, dass Tunnelbauwerke in ihrer Gesamtheit diesen „(...) Anforderungen der Sicherheit und Ordnung genügen“.⁴³⁹

Zur dauerhaften Gewährleistung der sicherheits- und nutzungsrelevanten Anforderungen ist während der Nutzungsphase eine Vielzahl an Leistungen unterschiedlicher Ausprägung zu erbringen. Im Besonderen der steigende Technisierungsgrad führt vermehrt dazu, dass gegenüber dem eigentlichen Massivbauwerk, ein erhöhter Versorgungs- und Instandhaltungsaufwand – vergleichbar mit Industrieanlagen – anfällt.⁴⁴⁰

Zur Bestimmung der in der Nutzungsphase anfallenden Leistungen ist DIN 31051 – Grundlagen der Instandhaltung – als Ausgangsbasis heranzuziehen. Dabei dient die Instandhaltung der Aufrechterhaltung des funktionsfähigen Zustandes und umfasst die wesentlichen Leistungen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung.⁴⁴¹ Ergänzt wird dies durch DIN 1076 mit Hinweisen zur Überwachung und Prüfung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen und Wegen⁴⁴² sowie dem Bauwerks-Management-System (BMS)⁴⁴³ zur Erhaltungsplanung.

⁴³⁷ in Anlehnung an den Begriff „Produktion“ – siehe DANGELMAIER (2003), S. 49

⁴³⁸ vgl. FGSV (2006), S. 7

⁴³⁹ BMJV (2013), Bundesfernstraßengesetz (FStrG) § 4

⁴⁴⁰ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 247

⁴⁴¹ vgl. DIN 31051 (2003), S. 2 ff. oder auch DIN EN 13306 (2010), S. 26 ff.

⁴⁴² vgl. DIN 1076 (1999)

⁴⁴³ vgl. HAARDT (2002)

Im Hinblick auf die Tunnelausstattung ist der Prozessrahmen um die dabei anfallenden Leistung zu erweitern. Mit den Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)⁴⁴⁴ sowie dem Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT)⁴⁴⁵ liegen hierzu bereits erste Ansätze zur Leistungsabgrenzung vor. Weitere Anhaltspunkte zur Bestimmung der Prozesse in der Nutzungsphase liefern u. a. das Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen⁴⁴⁶, die Richtlinie zur Ermittlung und Verrechnung von Kosten im Straßenbetriebsdienst an Bundesfernstraßen⁴⁴⁷ oder die Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln (RI-BWD-TU)⁴⁴⁸. Darüber hinaus sind Arbeitsanweisungen, Betriebsanleitungen oder weiterführende Herstellerangaben einzubeziehen.

Aufgrund der Vielfältigkeit der einzelnen Leistungen für die unterschiedlichen Bauelemente erfolgt eine Strukturierung und Zusammenfassung der Leistungen in übergeordneten Prozessen. Diese fallen mitunter zeitgleich bzw. mehrfach über den Nutzungszeitraum an (Abbildung 6.14). Die jeweils zu erbringenden Leistungen sind bei der Bestimmung des Moduls explizit zu erfassen, so dass die notwendige Transparenz und Vergleichbarkeit gewahrt bleibt.

Die Instandhaltung, als wesentliche Aufgabe während der Nutzungsphase, umfasst nach DIN 31051 (und gleichlautend nach DIN EN 13606) alle Maßnahmen, die zur Erhaltung des funktionsfähigen Zustandes bzw. der Rückführung in diesen Zustand erforderlich sind.⁴⁴⁹ Umfang und Häufigkeit der Maßnahmen richten sich im Wesentlichen nach dem Modul und dem vorgesehenen Erhaltungsmangement. DIN EN 13606 unterscheidet dazu drei grundsätzliche Strategien:⁴⁵⁰

- präventive Instandhaltung
- zustandsorientierte Instandhaltung
- korrektive Instandhaltung

Mit einer **präventiven Instandhaltung** wird angestrebt, das Bauwerk und seine Bestandteile über den gesamten Lebenszyklus nahe am Sollzustand zu halten. In vordefinierten Abständen, bzw. bei Erreichen vorab festgelegter Zustandskriterien (z. B. Betriebsstunden) werden Maßnahmen ausgeführt, die eine dauerhafte Funktionsfähigkeit der Betrachtungseinheit sicherstellen. Dazu gehört auch, dass Bauteile präventiv getauscht werden.

Eine **zustandsorientierte Instandhaltung** umfasst sowohl reaktive als auch in die Zukunft gerichtete Leistungen. Ziel ist es, durch die Zusammenfassung einzelner Maßnahmen, die Anzahl der Eingriffe zu minimieren. Dabei wird eine kurzfristige Verschlechterung des Bauwerkszustands bewusst in Kauf genommen. Der Zeitpunkt für die Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen wird über den Zustand der Betrachtungseinheit bestimmt, was eine dauerhafte Zustandserfassung erforderlich macht.

Bei der Umsetzung einer **korrektiven Instandhaltung** werden Instandhaltungsmaßnahmen erst nach Überschreiten der Abnutzungsgrenze (Fehlfunktion) ausgeführt. Der Abnutzungsvorrat der Betrachtungseinheit wird dabei voll ausgereizt. Auf präventive Maß-

⁴⁴⁴ FGSV (2006)

⁴⁴⁵ FGSV (2011)

⁴⁴⁶ BMVBW (2004)

⁴⁴⁷ BMVBS (2006)A

⁴⁴⁸ BAST (2007)

⁴⁴⁹ vgl. DIN 31501 (2003), S. 3; DIN EN 13306 (2010), S. 6

⁴⁵⁰ vgl. DIN EN 13306 (2010), S. 22 f.

nahmen wird bewusst verzichtet, so dass ein Austausch erst nach Schadenseintritt bzw. unmittelbar vorher erfolgt (Abbildung 6.15).⁴⁵¹

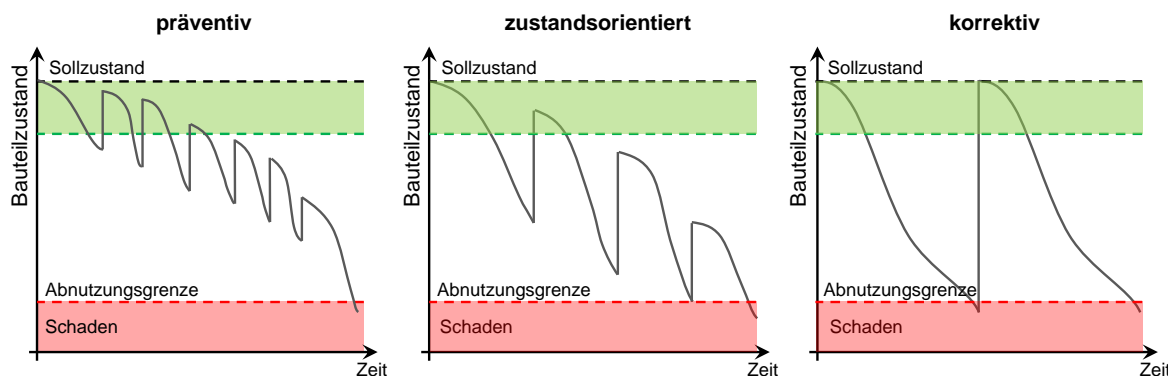


Abbildung 6.15: Instandhaltungsstrategien – präventiv, zustandsorientiert und korrektiv⁴⁵²

Zur Feststellung der aus ökonomischer Sicht vorteilhaftesten Strategie hat eine Untersuchung und Bewertung der finanziellen Auswirkungen jeder einzelnen Vorgehensweise zu erfolgen.⁴⁵³ Welche der Strategien letztlich umgesetzt wird, ist durch die Verantwortlichen festzulegen.

Die vorgestellten Instandhaltungsstrategien umfassen eine Vielzahl unterschiedlicher Leistungen. Für eine detaillierte Bestimmung der Lebenszykluskosten sowie zur Generierung und Umsetzung von Optimierungsmöglichkeiten, sind die einzelnen Maßnahmen als eigenständige Prozesse aufzufassen und die zugehörigen Attribute (Leistungen, Kosten, Schnittstellen) gesondert zu bestimmen. Besonders vor dem Hintergrund, dass die Leistungen für die Wartung, Reinigung und Inspektion im Wesentlichen zyklisch anfallen, während eine Instandsetzung überwiegend unregelmäßig bzw. in größeren Zeitabständen zyklisch stattfindet. Zur internen Abgrenzung ist auf die Definition des Begriffs „Instandhaltung“ aus dem Musterleistungsheft für den Straßenbetriebsdienst zurückzugreifen:

„Zur Instandhaltung der Ingenieurbauwerke gehören alle baulichen Maßnahmen kleineren Umfangs zur Substanzerhaltung, die mit geringem Aufwand in der Regel sofort nach dem Auftreten eines örtlichen Schadens von Hand oder maschinell ausgeführt werden können.“⁴⁵⁴

Hierbei wird der Begriff „Instandhaltung“ synonym zum Begriff „Wartung“ verwendet. Auch HAARDT differenziert im Hinblick auf den Leistungsumfang und unterstreicht dadurch eine getrennte Betrachtung der einzelnen Maßnahmen der Instandhaltung.⁴⁵⁵ Dazu unterteilt die Richtlinie für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING-OSA) Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer technischen Dringlichkeit zur Behebung von Einzelschäden (1 = Nur laufende **Unterhaltung** erforderlich; 2 – 4 = **Instandsetzung mittelfristig bis umgehend erforderlich**).⁴⁵⁶

⁴⁵¹ vgl. DIN EN 13306 (2010), S. 23; KUHLMANN ET AL. (2011), S. 705; HOLST (2012)A, S. 4; ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 488

⁴⁵² in Anlehnung an ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 488

⁴⁵³ vgl. HOLST (2012)A; HOLST (2012)B

⁴⁵⁴ vgl. BMVBW (2002), S. 20

⁴⁵⁵ vgl. HAARDT (2002), S. 11

⁴⁵⁶ vgl. BMVBS (2007)A, S. 17

Die vorgenannten Differenzierungen werden aufgegriffen und eine Unterteilung der Instandhaltung hinsichtlich der zu erbringenden Leistungen vorgenommen. In Anlehnung an DIN 31051 werden hierzu folgende Prozesse unterschieden:⁴⁵⁷

- Wartung
- Inspektion
- Instandsetzung
- Verbesserung

Die Maßnahmen der Verbesserung werden in die Prozesse Erneuerung und Modernisierung weiter aufgegliedert. Erweitert wird diese Aufstellung durch die Prozesse Versorgung und Reinigung.

6.3.2.1 Wartung

Der Prozess der Wartung umfasst nach DIN 31051 alle „*Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats*“.⁴⁵⁸ Aufgrund der Vielfältigkeit der Wartungsarbeiten sind diese für jedes Bauteil gesondert zu bestimmen. Sie umfassen beispielsweise das Nachfüllen bzw. den Austausch von Betriebs- und Hilfsstoffen oder die Kalibrierung von Einstellungsparametern. Mitunter wird auch die Reinigung einbezogen. Im Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT) wurde eine erste Zusammenstellung der Leistungen und Häufigkeiten für die wesentlichen Bestandteile vorgenommen.⁴⁵⁹ Vereinzelt wurden bereits weitergehende Vorgaben zur Wartung für spezielle Bauteile ausgearbeitet.⁴⁶⁰ Darüber hinaus sind zur Bestimmung der Leistungen spezielle Herstellervorgaben für die einzelnen Module einzubeziehen.⁴⁶¹

Zur Ausnutzung von Synergieeffekten werden die Wartungsarbeiten in vielen Fällen mit den Maßnahmen der Inspektion und Reinigung der jeweiligen Bauteile zusammengefasst. Sofern eine Differenzierung der Kosten nicht umsetzbar bzw. sinnvoll ist, hat eine Zuweisung der Kosten zum maßgeblichen Prozess zu erfolgen. Alternativ können die Kosten über einen vorher definierten Schlüssel zugewiesen werden. Unabhängig von der Art der Zuweisung ist die Vorgehensweise nachvollziehbar zu dokumentieren.

6.3.2.2 Inspektion

Die Maßnahmen der Inspektion dienen „*(...) zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung*“.⁴⁶² Die Inspektion ist vergleichbar mit der im M KWPT vorgesehenen „Kontrolle“⁴⁶³ oder der in DIN 1076 beschriebenen „Prüfung.“⁴⁶⁴ Grundsätzliches Ziel ist es, Mängel und Schäden frühzeitig zu erkennen bzw. zu prognostizieren und den finanziellen Aufwand zur Sanierung zu reduzieren.⁴⁶⁵

⁴⁵⁷ vgl. DIN 31051 (2003), S. 3 f.

⁴⁵⁸ DIN 31051 (2003), S. 3

⁴⁵⁹ vgl. FGSV (2011), S. 6 ff.

⁴⁶⁰ Beispielsweise wird mit der „Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln“ (RI-BWD-TU) eine Reduzierung der Versinterungsneigung durch gezielte Wartungsmaßnahmen (Kamerabefahrung, Spülen usw.) angestrebt. [vgl. BAST (2007), S. 12 ff.]

⁴⁶¹ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 249

⁴⁶² DIN 31051 (2003), S. 3

⁴⁶³ FGSV (2011), S. 6

⁴⁶⁴ BMVBW (2004), S.

⁴⁶⁵ vgl. DIN 1076 (1999), S. 2

Für eine einheitliche und regelmäßige Prüfung wurden durch den Gesetzgeber unterschiedliche Regelwerke erlassen. Wesentlich dabei ist DIN 1076 als Grundlage zur Überprüfung und Überwachung der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit von Ingenieurbauwerken (Abbildung 6.16).⁴⁶⁶ Ergänzend gilt es Herstellerangaben bzw. sicherheitstechnische Anforderungen zu berücksichtigen.

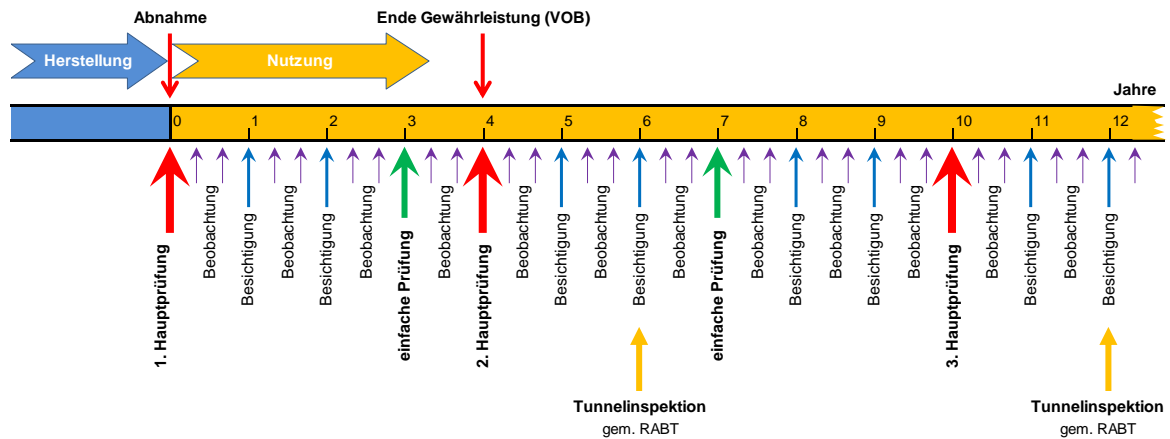


Abbildung 6.16: Inspektionen gemäß DIN 1076 und RABT 2006

6.3.2.3 Instandsetzung

Die Instandsetzung grenzt sich zum Prozess der Wartung dadurch ab, dass der Betrachtungsgegenstand nicht mehr seine primäre Funktion erfüllen kann und durch eine grundlegende Reparatur oder Austausch einzelner Komponenten wieder in einen funktionsfähigen Zustand zurückgeführt wird.⁴⁶⁷ Von der Instandsetzung ausgenommen sind ein vollständiger Austausch der Betrachtungseinheit (= Erneuerung) bzw. Maßnahmen, die zu einer Funktionsverbesserungen (= Modernisierung) führen.⁴⁶⁸

Bei der Instandsetzung handelt es sich um Maßnahmen größeren Umfangs (in Abgrenzung zur Wartung), so dass vorab eine eigenständige Planung und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung der Instandsetzungsaufgabe zu erfolgen hat.⁴⁶⁹

Zur genaueren Bestimmung der Leistungen kann auf eine Vielzahl an Richtlinien und Veröffentlichungen zurückgegriffen werden. Beispielhaft sei an dieser Stelle auf die ZTV-ING „Teil 3 – Massivbau, Abschnitt 4 – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ oder die DAfStb-Richtlinie "Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen" verwiesen.⁴⁷⁰

6.3.2.4 Erneuerung

Der Prozess der Erneuerung umfasst den Austausch ganzer Betrachtungseinheiten und die dazu notwendigen Leistungen. Dabei wird die grundlegende Funktion des Bauteils nicht verändert. Neben dem Austausch ist die Planung der Erneuerung, notwendige Hilfsmaßnahmen sowie die Entsorgung der bisherigen Bauteile einzubeziehen.

⁴⁶⁶ DIN 1076 (1999)

Weitere Ansätze zur Bestimmung des Leistungsumfangs bei der Inspektion sowie deren Häufigkeit sind unter anderem dem M KWPT, den RABT, DIN VDE 0105-100 und BGV A3 zu entnehmen. vgl. FGSV (2011), S. 6 ff.; FGSV (2006), S. 4; DIN VDE 0105-100 (2009); HENNIG (2012), S. 214 ff.; BGW (2005), § 3

⁴⁶⁷ DIN 31051 (2003), S. 4; HOAI (2013), § 2 (8)

⁴⁶⁸ vgl. DIN 31051 (2003), S. 4

⁴⁶⁹ vgl. BMVBS (2007)_B, S. 5; BMVBS (2007)_C, S. 4

⁴⁷⁰ siehe BAST (2013); DAfSTb (2001)

Eine Erneuerung kann, abhängig von der Instandhaltungsstrategie, präventiv, zustandsorientiert oder korrektiv erfolgen. Bei einer präventiven Erneuerung ist vorab, ausgehend von beobachteten Nutzungsdauern bzw. definierten Zustandskriterien, ein Austauschzeitpunkt festzulegen.

6.3.2.5 Modernisierung

Bei einer Modernisierung erfolgt – vergleichbar mit einer Erneuerung – ein vollständiger Austausch einer oder mehrerer Betrachtungseinheiten, allerdings unter Berücksichtigung der technischen Weiterentwicklung. Häufig ist damit eine Erweiterung der Funktionalität der Betrachtungseinheit verbunden. Ziel ist eine technische und ökonomische Verbesserung.⁴⁷¹ Im Gegensatz zur Erneuerung hat dies eine Erhöhung des Anlagenwertes zur Folge.⁴⁷² In der erweiterten Betrachtung umfasst die Modernisierung auch die Umsetzung geänderter normativer oder gesetzlicher Vorgaben.

Aufgrund der nur sehr begrenzt vorhersehbaren technischen, normativen oder gesetzlichen Entwicklungen ist eine längerfristige Prognose der erforderlichen Leistungen und Kosten, im Besonderen bei der Planung eines neuen Tunnelbauwerkes, nur bedingt möglich. Kurzfristige Planungen für bereits bestehende Bauwerke sind mit Kenntnis über Umfang der notwendigen Maßnahmen weniger problematisch (z. B. die Anpassung der Tunnelausstattung an die Erweiterung der RABT).⁴⁷³

6.3.2.6 Versorgung

Für einen störungsfreien Betrieb hat eine unterbrechungsfreie Versorgung der betriebstechnischen Tunnelausstattung mit elektrischer Energie zu erfolgen.⁴⁷⁴ Insbesondere für die Tunnelbeleuchtung sowie die Tunnellüftung ist ein Großteil der Energie aufzubringen. Weitere Energieverbraucher sind u. a. die Tunnelsteuerung, Verkehrsleittechnik, EDV-Anlagen, Beleuchtung und Lüftung der Betriebsräume.

Zur Aufrechterhaltung einer Stromversorgung bei einem Netzausfall ist eine Ersatzstromversorgungsanlage (USV-Anlage)⁴⁷⁵ vorzuhalten. Diese ist auf einen reduzierten Notbetrieb zu dimensionieren und hat die Rettung der Tunnelnutzer zu ermöglichen.⁴⁷⁶ Die Energieversorgung ist während der Überbrückungszeit⁴⁷⁷ durch eigens dafür vorgesehene Batterien oder diesel- bzw. gasbetriebene Stromgeneratoren sicherzustellen. Für eine Versorgung mit Generatoren sind Betriebsstoffe (Diesel oder Gas) im entsprechenden Umfang vorzuhalten.⁴⁷⁸

Neben der Energieversorgung ist für den Notfall eine ausreichende Löschwasserversorgung zu gewährleisten. Durch regelmäßige Probeentnahmen ist die Funktionsfähigkeit zu kontrollieren.⁴⁷⁹

⁴⁷¹ vgl. DIN 32736 (2000), S. 3

⁴⁷² vgl. PFRÜNDER (2010), S. 63; SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 249; HOAI (2013), § 2 (6)

⁴⁷³ siehe hierzu beispielsweise BAST (2009)

⁴⁷⁴ vgl. FGSV (2006), S. 42

⁴⁷⁵ Unabhängige Stromversorgung (USV)

⁴⁷⁶ vgl. FGSV (2006), S. 43

⁴⁷⁷ Die Überbrückungszeit entspricht dem Zeitraum, „(...) für die die USV-Anlage die Verbraucheranlage ständig unter festgelegten Betriebsbedingungen bei Ausfall der üblichen Stromversorgung mit elektrischer Energie versorgen muss“. [DIN 6280-12 (1996), S. 3]

⁴⁷⁸ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 249 f.

⁴⁷⁹ vgl. FGSV (2006), S. 40

Anfallendes und verunreinigtes Wasser (Oberflächenwasser, Reinigungswasser usw.) bzw. anfallender Müll ist fachgerecht zu entsorgen.⁴⁸⁰ Aufgrund des geringen Umfangs sind die dazu notwendigen Leistungen, respektive die dabei anfallenden Kosten, dem Prozess Versorgung oder dem Prozess Reinigung der einzelnen Module zuzuweisen.

Die entstehenden Kosten umfassen im Wesentlichen die bedarfsgebundenen Kosten für Energie bzw. Wasser. Zusätzlich sind die jährlichen Kosten für die Anschlussbereitstellung oder sogenannte Grundbeiträge in die Bewertung einzubeziehen. Aufgrund unterschiedlicher Versorgungstarife sind zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit, die Kosten ausgehend von der Bedarfsmenge zu bestimmen.

6.3.2.7 Reinigung

Mit der Reinigung des Tunnels bzw. der technischen Ausstattung werden unterschiedliche Ziele verfolgt. Beispielsweise soll die Reinigung der mit Ruß und Staub belegten Tunnelwände deren Reflexionseigenschaften verbessern. Die damit bewirkte optische Aufhellung hat zur Folge, dass zur Erzeugung der erforderlichen Leuchtdichte weniger Energie für die Tunnelbeleuchtung aufzuwenden ist.⁴⁸¹ Die Häufigkeit und der Umfang der Reinigung werden wesentlich durch die Verkehrsbelastung (Schwerverkehr) und den Schmutzeintrag bestimmt.

Die Verkehrsflächen sowie Flucht- und Rettungswege sind zu reinigen, um die Sicherheit des Tunnelnutzers gewährleisten zu können. Es gilt Hindernisse zu entfernen bzw. ein frühzeitiges Erkennen von Gefahrensituationen zu ermöglichen. Dazu gehört auch eine Lesbarkeit der Beschilderung.⁴⁸²

Die Reinigung dient des Weiteren der Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit. Beispielsweise soll durch Reinigung der Entwässerung bzw. der Dränage eine Versinterungen oder Verschmutzung und daraus folgend ein Wasseraufstau vermieden werden. In diesem Fall wäre die Reinigung mit der Wartung einer technischen Anlage vergleichbar.

Mit der Reinigung der Tunnelausstattung wird eine ähnliche Zielstellung verfolgt. Dabei erfolgt die Reinigung in vielen Fällen zusammen mit der Wartung und Funktionsprüfung. Aufgrund der Sicherheitsrelevanz und der höheren Anfälligkeit der betriebstechnischen Ausstattung gegenüber Baukonstruktion ist der Reinigungsturnus verkürzt. Abhängig vom Verschmutzungsdruck erfolgt eine Reinigung durchschnittlich ein- bis zweimal pro Jahr.⁴⁸³

Über alle Bauteile hinweg hat die Reinigung die weitere Aufgabe, Schäden oder Verschleiß sichtbar zu machen, so dass Instandsetzungsarbeiten frühzeitig eingeleitet werden können. Dazu hat eine Reinigung im Vorfeld von Inspektionen zu erfolgen.

6.3.3 Verwertungsphase

Die Verwertung als abschließende Phase des Lebenszyklus setzt unmittelbar mit Ende der Nutzungsphase ein. Für Tunnelbauwerke ist dabei zwischen drei grundlegenden Prozessen und den dabei anfallenden Maßnahmen zu differenzieren:

- Umnutzung
- Rückbau
- Revitalisierung

⁴⁸⁰ vgl. FGSV (2011), S. 18

⁴⁸¹ vgl. FGSV (2011), S. 15

⁴⁸² vgl. FGSV (2011), S. 15 f.

⁴⁸³ vgl. FGSV (2011), S. 11 und S. 18

6.3.3.1 Umnutzung

Umnutzung bedeutet eine Veränderung der bisherigen (genehmigten) Nutzung bzw. der Zweckbestimmung der baulichen Anlage.⁴⁸⁴ Die dabei anfallenden Leistungen, auch wenn sie den Prozessen der Nutzungsphase zu zuordnen wären (z. B. Instandsetzung oder Modernisierung), sind unter dem Prozess der Umnutzung zu subsumieren.

6.3.3.2 Rückbau

Ein Rückbau ist die gezielte, vollständige Beseitigung einer baulichen Anlage und umfasst alle anfallenden Leistungen für Abbruch und Entsorgung inkl. Planung. Darin eingeschlossen sind die Leistungen, die zur Freimachung und Herrichtung des Grundstückes anfallen.⁴⁸⁵

6.3.3.3 Revitalisierung

Bei einer Revitalisierung erfolgt eine so vollumfängliche und tiefgreifende Sanierung, dass das revitalisierte Bauwerk mit dem Erscheinungsbild eines Neubaus zu vergleichen ist.⁴⁸⁶ Dabei wird zum Teil die vollständige Tunnelausstattung ausgetauscht bzw. grundlegend instand gesetzt. Mitunter erfolgt auch eine grundhafte Instandsetzung der Tragstruktur. Die Revitalisierung grenzt sich zu den Prozessen Instandsetzung, Erneuerung, Modernisierung aus der Nutzungsphase in der Form ab, dass hierbei nicht singuläre Bauteile saniert bzw. ausgetauscht werden. Es handelt sich vielmehr um eine Fülle an Maßnahmen, mit dem Ziel, die Nutzbarkeit des Bauwerkes maßgeblich zu verlängern. HAACK verwendet hierzu den Begriff der „*Grundsanierung*“.⁴⁸⁷ Die Revitalisierung ist dadurch geprägt, dass aufgrund des tiefgreifenden Eingriffes, die Nutzung über einen längeren Zeitraum nur sehr eingeschränkt bzw. überhaupt nicht möglich ist.

Weiterführend kann auch eine mögliche Stilllegung bzw. Veräußerung des Bauwerkes für die Verwertung in Betracht kommen. Am Bauwerk selbst werden dabei keine Veränderungen vorgenommen werden. Leistungen und Kosten fallen nicht bzw. nur in sehr geringem Umfang an. Im Zuge dieser Arbeit wird aus diesem Grund auf eine eingehende Definition verzichtet. Sollten im Zuge einer Lebenszykluskostenuntersuchung dennoch Maßnahmen solcher Ausprägung Berücksichtigung finden, sind die entsprechende Prozesse zu bestimmen und ins Modulare Prozessmodell zu integrieren.

Im Bereich der Immobilienwirtschaft, wo eine Umnutzung oder ein Rückbau eines Bauwerkes aus ökonomischen oder strategischen Gründen häufiger in Betracht gezogen wird, werden die Leistungen und Kosten für die Verwertung in vielen Fällen dem Nachfolgebauwerk und dessen Lebenszyklus zugewiesen.⁴⁸⁸ Eine derart gelagerte Vorgehensweise könnte auch in die Zielstellung und den Betrachtungsrahmen für Tunnelbauwerke aufgenommen werden. Dies hätte zur Folge, dass eine Verwertungsphase des geplanten Projektes nicht in die Lebenszykluskostenbetrachtungen aufzunehmen ist. Dafür ist die Herstellungsphase um die Verwertung des bestehenden Bauwerkes zu erweitern.

⁴⁸⁴ vgl. STMI (2006), Art. 62

⁴⁸⁵ vgl. DIN 276-4 (2009), S. 8; PFRÜNDNER (2010), S. 62

⁴⁸⁶ vgl. RIEGEL (2004), S. 7

⁴⁸⁷ HAACK (2011), S. 9

⁴⁸⁸ vgl. GEFMA 100-1 (2004), S. 15

6.4 Kostenstruktur

Die Ausgangsbasis zur Ermittlung der Kosten eines Tunnelbauwerkes – über alle Lebensphasen hinweg – bildet eine durchgängige und konsistente Kostenstruktur.⁴⁸⁹ Angepasst an die Grundstruktur des Modulare Prozessmodells ist die Kostenstruktur hierarchische aufgebaut. Auch vor dem Hintergrund, dass eine Anpassung an den jeweiligen Informations- und Planungsstand zu erfolgen hat.

Mit DIN 276-1 für Bauwerke des Hochbaus, respektive mit DIN 276-4 für Ingenieurbauwerke, existieren für die Herstellkosten bereits hierarchische Kostenstrukturen.⁴⁹⁰ Auch RAB-ING⁴⁹¹ bzw. AKS⁴⁹², unter Einbeziehung des Standardleistungsbuches (STLB-Bau), streben eine Strukturierung der Herstellkosten an. Die für die ganzheitliche Bewertung notwendigen Folgekosten aus der Nutzungsphase bleiben dabei außen vor. Insbesondere eine verursachungsgerechte Zuweisung von Erst- und Folgekosten ist in den vorliegenden Regelwerken – auch in Ermangelung einer entsprechenden Kostenstruktur für die Folgekosten (vergleichbar mit DIN 18960) – nicht vorgesehen. Eine direkte Übertragung der vorhandenen Kostenstrukturen auf die durch das Modell umgesetzte hierarchisch-modulare Strukturierung ist dadurch nicht möglich. Zur Erfüllung der gestellten Anforderungen hinsichtlich Transparenz, Vergleichbarkeit sowie einer gleichgewichteten Behandlung von Erst- und Folgekosten, ist eine eigenständige Kostenstruktur zu entwickeln.

Ausgangsbasis ist die vorgenommene Strukturierung von Tunnelbauwerken.⁴⁹³ Aus der hierarchisch-modularen Bauwerksstruktur heraus und unter Zuordnung der einzelnen Prozesse, bildet sich eine zweidimensionale Kostenmatrix ab (Abbildung 6.17). Diese Kostenstruktur enthält sämtliche, für die einzelnen Bestandteile anfallenden Kosten und erlaubt unter Einbeziehung der Prozesse eine eindeutige Zuordnung von Erst- und Folgekosten auf allen Hierarchieebenen.

Die Aussagekraft der Kostenmatrix hängt wesentlich vom Grad der Detaillierung und der Genauigkeit der enthaltenen Kostengrößen ab. Mit steigendem Informationsgrad nimmt auch die Prognosegenauigkeit zu.⁴⁹⁴ Ist eine direkte Kostenzuordnung auf Modulebene nicht gegeben, z. B. wenn für die Kostenplanung einer ganzen Baugruppe noch keine ausreichend aussagekräftige Planung vorliegt oder Kostenbestandteile einzelnen Modulen nicht eindeutig zugeordnet werden können, besteht der Vorteil der vorgenommenen Strukturierung darin, die Kosten z. B. auf Baugruppenebene bzw. in übergeordneten Strukturebenen zu erfassen.

Die Berücksichtigung von Kapital-, Verwaltungs-, Objektmanagement- oder Überwachungskosten, wie dies in DIN 18960 für Immobilien vorgenommen wird, ist in der bisherigen Ausgestaltung nicht vorgesehen.⁴⁹⁵ Durch den modularen Aufbau des Gesamtsystems können durch Einführung entsprechender Prozesse die jeweiligen Kosten auf allen Strukturebenen (Bauwerk, System, Baugruppe, Modul) – abhängig von der Detaillierungstiefe – im Modell und der Kostenmatrix erfasst werden. Dies wird in der Anwendung im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht weiter verfolgt.

⁴⁸⁹ siehe Anforderungen an das Lebenszykluskostenmodell (Abs. 2.3)

⁴⁹⁰ vgl. DIN 276-1 (2008); DIN 276-4 (2009)

⁴⁹¹ vgl. BMVBW (1995)

⁴⁹² vgl. BMV (1985)

⁴⁹³ siehe hierzu Abs. 6.1

⁴⁹⁴ vgl. HARDKOP (2010), S. 25 f.

⁴⁹⁵ vgl. DIN 18960 (2008), S. 8 ff.

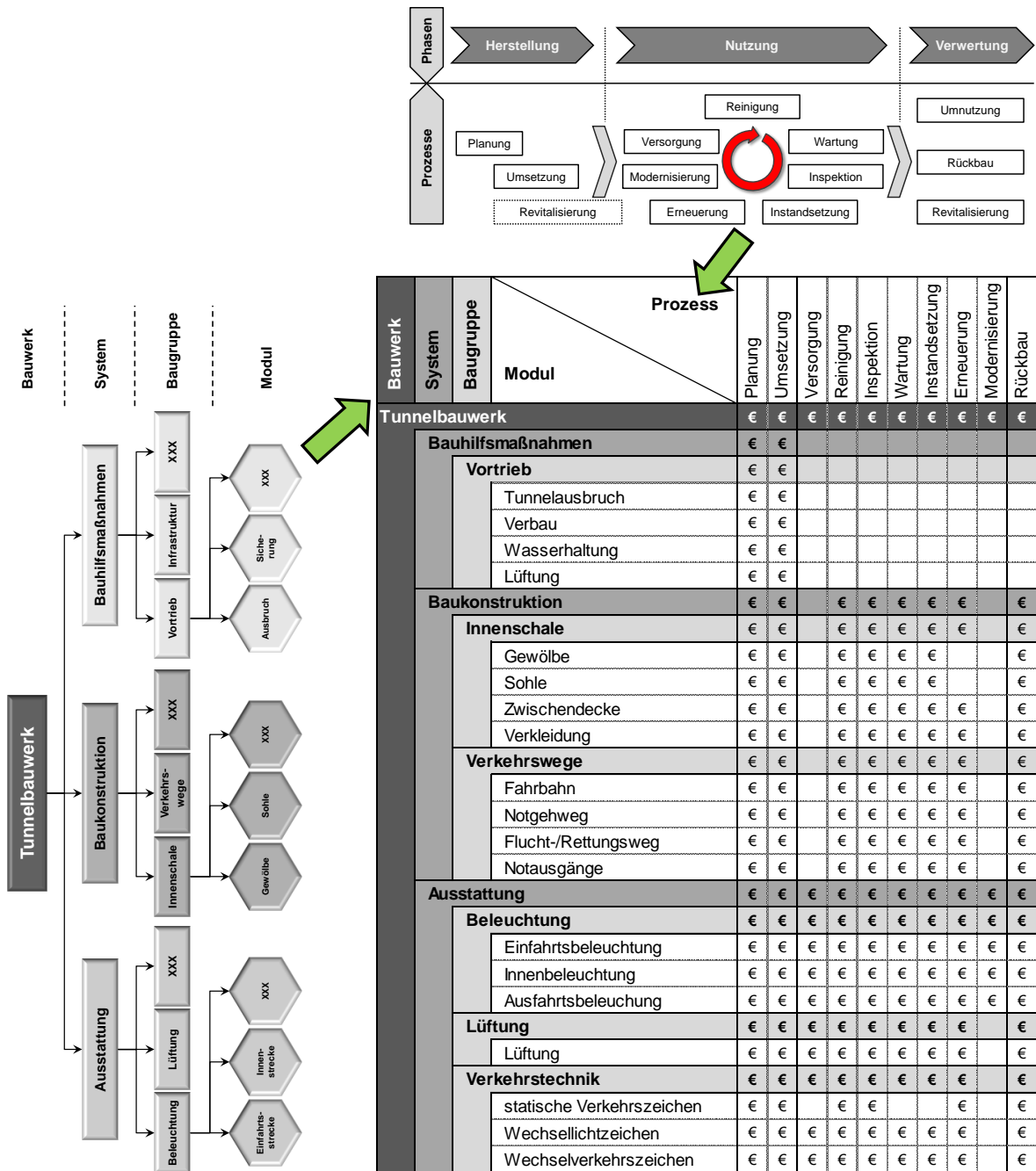


Abbildung 6.17: Kostenmatrix (beispielhafte Ausgestaltung)

Bei der Ausgestaltung werden die Kosten ausgehend vom Betrachtungszeitpunkt geplant. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit hat eine Berücksichtigung der Preissteigerung bzw. Geldentwertung zu erfolgen. In die Kostenmatrix selbst sind nominale Größen aufzunehmen. Die Kostenerfassung hat dabei einheitlich zu einem definierten Stichtag zu erfolgen (z. B. auf Basis einer endfälligen Berechnung zum 31.12. des jeweiligen Jahres). Daraus resultiert, dass für jedes Betrachtungsjahr eine eigene Kostenmatrix aufzustellen ist.⁴⁹⁶

⁴⁹⁶ In Abs. 10.2.2 ist eine erste Anwendung und Ausgestaltung der Kostenstruktur angeführt.

6.5 Schnittstellenmatrix

Mit der vorgenommenen Strukturierung wurde das Bauwerk in eigenständige Module dekomponiert. Aufgrund der Komplexität des Untersuchungsgegenstandes ist es allerdings nicht möglich, eine vollständige Unabhängigkeit der einzelnen Module (über die physische und technische Abhängigkeiten hinaus) zu erzielen. Um die aus der Modularität resultierenden Vorteile (Austauschbarkeit einzelner Module bzw. Erweiterbarkeit des Untersuchungsrahmens) dennoch zu gewährleisten, sind die vorhandenen Wechselwirkungen und Einflussparameter als sogenannte Schnittstellen zu erfassen. Dies geschieht im Zuge der Erhebung der Attribute für die Ausgestaltung der einzelnen Module (Abs. 6.2.3).

Zur Wahrung der Übersichtlichkeit und zur gezielten Generierung von Optimierungs- und Substitutionspotentialen sind diese Parameter in einer Schnittstellenmatrix zu erfassen (Abbildung 6.18).⁴⁹⁷ Dabei gilt es, den vollständigen Untersuchungsrahmen abzubilden.

Für eine bessere Handhabbarkeit ist eine Priorisierung der Parameter vorzunehmen. Vorgelegte Sensitivitätsanalysen tragen dazu bei, die signifikanten Einflussgrößen zu identifizieren. Aufgrund bislang nicht erhobener Daten, wird eine Gewichtung nur auf Basis einer Eingruppierung in drei grundsätzliche qualitative Ausprägungen vorgenommen:

- keine Interdependenzen
- untergeordnete Interdependenzen
- ausgeprägte Interdependenzen

Durch die Erhebung aussagekräftiger Daten ist zukünftig eine Erweiterung in Form quantitativer Abhängigkeitsausprägungen projektspezifisch zu bestimmen und im Modell zu integrieren.

Bauwerk	System	Baugruppe	Parameter		Module						Bauwerk								Verkehr	
			Modul	Prozess	Gewölbe	Sohle	Beschichtung	Einfahrtsbeleuchtung	Innenbeleuchtung	Lüftungsanlage	Tunnellänge	Tunnelquerschnitt	Querschnittsform	Tunnelumfang	Steigung/Gefälle	Standstreifen	Pannenbuchten	Ausrichtung	Portalgestaltung	Betriebsart
Tunnelbauwerk																				
Baukonstruktion																				
Innenschale																				
		Gewölbe	Planung		x	x	-	-	-		x	x	x	x	o	x	x	-	-	-
			Umsetzung		x	x	-	-	-		x	x	x	x	o	x	x	-	-	-
			Versorgung		-	-	-	-	o		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
			Reinigung		-	x	-	-	o		x	x	x	x	x	o	o	-	-	-
			Inspektion		-	o	-	-	-		x	x	x	x	-	o	o	-	-	-
			Wartung		-	x	-	-	-		x	x	x	x	-	o	o	-	-	-
			Instandsetzung		-	x	-	-	-		x	x	x	x	-	o	o	-	-	-
			Erneuerung		-	-	-	-	-		x	x	x	x	-	o	o	-	-	-
Ausstattung																				
Beleuchtung																				
		Einfahrtsbeleuchtung	Planung		x	-	x		x	-	-	x	o	-	o	o	-	x	x	x
			Umsetzung		x	-	x		x	-	-	x	o	-	o	o	-	x	x	x
			Versorgung		x	-	x		x	o		x	o	-	o	o	-	x	x	x

Legende:

- keine Interdependenzen
- o untergeordnete Interdependenzen
- x ausgeprägte Interdependenzen

Abbildung 6.18: Schnittstellenmatrix (beispielhafte Ausgestaltung)

⁴⁹⁷ Für das in Abbildung 6.18 dargestellte Beispiel würden exemplarisch für das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“, die Kosten für den Prozess Planung durch das Modul „Gewölbe“ oder durch die Portalgestaltung stark beeinflusst werden. Keinen Einfluss hätte die Ausgestaltung der Sohle.

6.6 Modulares Prozessmodell

Die Vielzahl an Komponenten, deren komplexes Zusammenwirken und die vielen, sehr differenzierten Leistungen für Herstellung, Betrieb und Verwertung machen eine strukturierte Erfassung der Kosten für Tunnelbauwerke erforderlich. Hierzu wurde in dem vorangegangenen Kapitel, die in Abs. 5.3 hergeleitete hierarchisch-modulare Strukturierung auf Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur übertragen. Die Module repräsentieren dabei weitgehend unabhängige Einheiten, die eine vollständige Abbildung des Untersuchungsgegenstandes erlauben. Entscheidend für die Modulbildung sind die technisch-funktionalen Aufgabe sowie die Kriterien der Unabhängigkeit und Integrität. Aus der Eigenständigkeit der Module lässt sich ableiten, dass die übergeordneten Baugruppen und Systeme ebenso als weitestgehend unabhängige Teilsysteme fungieren. Zur weitergehenden Strukturierung und zur Steigerung der Transparenz wurden für die Module übergeordnete Prozesse – ausgehend von den Lebenszyklusphasen – identifiziert (Abs. 6.3). Hieraus erfolgt eine direkte Zuordnung und Bestimmung der Attribute (Leistungen, Kosten, Zeitliche Parameter und Schnittstellen) für das einzelne Modul.

Durch die Zuweisung von Modulen und Prozessen ist die Bildung einer – für die Vergleichbarkeit wesentlichen – konsistenten, zweidimensionalen Kostenstruktur gegeben (Abbildung 6.17). Mit Berücksichtigung einer zeitlichen Komponente wird diese Kostenmatrix um eine dritte Dimension (Zeit) erweitert. Die Einbeziehung der Schnittstellen und Abhängigkeiten (Abbildung 6.18) vervollständigt das Modulare Prozessmodell für eine ganzheitliche und transparente Kostenerfassung für Straßentunnel (Abbildung 6.19).

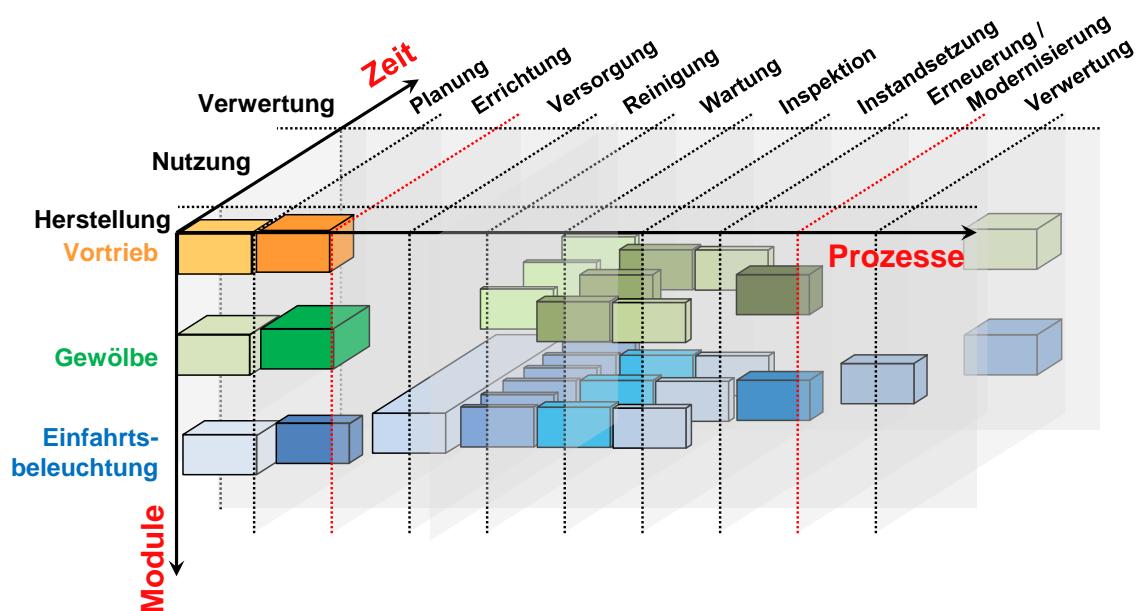


Abbildung 6.19: Das Modulare Prozessmodell (beispielhafte Ausgestaltung)

Das entwickelte Modell bildet die Ausgangsbasis zur Bestimmung der Lebenszykluskosten bzw. für die Auswertung und Optimierung der Kosten auf Modul-, Phasen- oder Prozessebene. Die erzielte Transparenz erlaubt die Identifizierung der wesentlichen Kostentreiber unter Zuweisung von Erst- und Folgekosten. Durch die gewählte Strukturierung kann neben einer Aggregation der Kosten für das Gesamtbauwerk, eine system-, baugruppen- und modulweise Auswertung erfolgen. Erweiternd ist durch Zusammenführung gleichartiger Prozesse oder übereinstimmender Lebensphasen eine prozess- bzw. pha-

senbezogene Auswertung möglich.⁴⁹⁸ Eine entsprechende detaillierte Auswertung ist notwendig, um nicht ausschließlich die Gesamtkosten, sondern auch die einzelnen Bestandteile in einer erweiterten Betrachtung einem Vergleich und der angestrebten Optimierung zuführen zu können.⁴⁹⁹

6.7 Anwendungsspektrum des Modulare Prozessmodells

Das Modulare Prozessmodell wurde zur ganzheitlichen, strukturierten Erfassung der Kosten sowohl für neu zu errichtende Tunnelbauwerke als auch für Bestandsbauwerke entwickelt. Durch die gewählte Modularität kann der Untersuchungsrahmen vom einzelnen Modul bis zum gesamten Bauwerk alle Gestaltungsvarianten umfassen. Dabei wesentlich ist die Berücksichtigung der bei der Modulbildung zu generierenden internen und externen Schnittstellen.

Abhängig von der Zielstellung bzw. der vorliegenden Planungstiefe können aufgrund der hierarchisch-modularen Struktur einzelne Module eingehender bearbeitet werden, währenddessen andere Bereiche übergeordnet auf Baugruppen- bzw. auf Systemebene einbezogen werden. Beispielsweise können einzelnen Modulen nicht eindeutig zuordenbare Attribute (Leistungen, Kosten usw.) in einem ersten Schritt, übergeordneten Einheiten zugewiesen werden. Zusätzlich kann der Untersuchungsrahmen flexibel auf die jeweilige Informationsdichte bzw. Zielstellung ausgerichtet werden (Abbildung 6.20). Mit voranschreitender Planung und damit steigender Informationsdichte bzw. bei Veränderung der Zielstellung, wird durch die Modularität eine Anpassung und Erweiterung bereits vorliegender Untersuchungen ermöglicht.

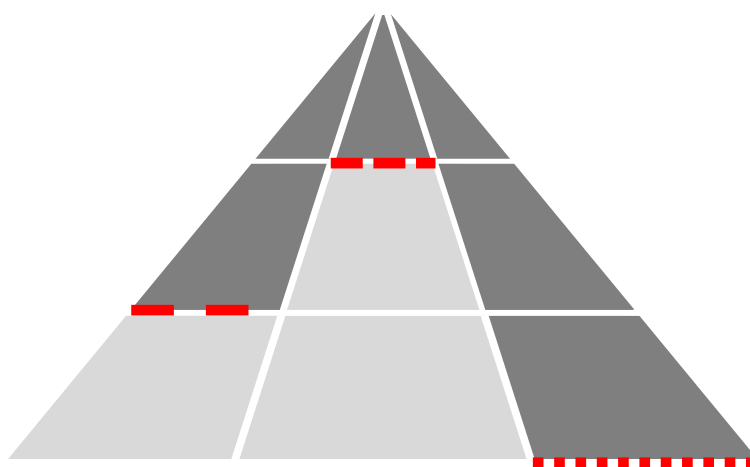


Abbildung 6.20: Flexible Ausgestaltung als Vorteil der modularen Strukturierung

Die zeitliche Anwendung des Kostenmodells ist nicht auf die Planungsphase (von der Grundlagenermittlung bis zur Ausführung) beschränkt. Vielmehr bildet das Modulare Prozessmodell, mit der darin hinterlegten konsistenten Kostenstruktur, die Ausgangsbasis für eine kontinuierliche Erfassung und Überprüfung der Kosten über alle Lebenszyklusphasen hinweg. Das Modell stellt die Grundlage zur Planungsunterstützung (Variantenuntersuchung, Instandhaltungsplanung, Budgetplanung usw.) und zur kontinuierlichen Optimierung, insbesondere während der Nutzungsphase dar.

⁴⁹⁸ vgl. ENGELHARDT (2014), S. 555; ENGELHARDT, SCHWARZ, THEWES (2014), S. 597 f.

⁴⁹⁹ vgl. SCHACH, JEHL, NAUMANN (2006), S. 260

Die Identifikation der wesentlichen Einflussparameter bietet zusammen mit der konsistenten Kostenstruktur die Möglichkeit der Generierung von stabilen und aussagekräftigen Kennzahlen. Diese bilden die Ausgangsbasis für einen Vergleich mit anderen Bauwerken über alle Strukturebenen sowie für die Umsetzung des Best-Practise Ansatzes.

Die Anwendung existierender Lebenszykluskostenmodelle beschränkt sich auf nur wenige Zeitpunkte im Lebenszyklus, bei denen signifikante Investitionsentscheidungen anstehen. Mit dem vorgestellten Modell und der Methodik ist nun eine dauerhafte Kostenerfassung und -planung auch während des Betriebs möglich. Zusätzlich ist durch Anwendung beispielsweise der Benchmarking-Methodik eine fortwährende Optimierung zur Umsetzung der ökonomischen Nachhaltigkeit umsetzbar (Abbildung 6.21).

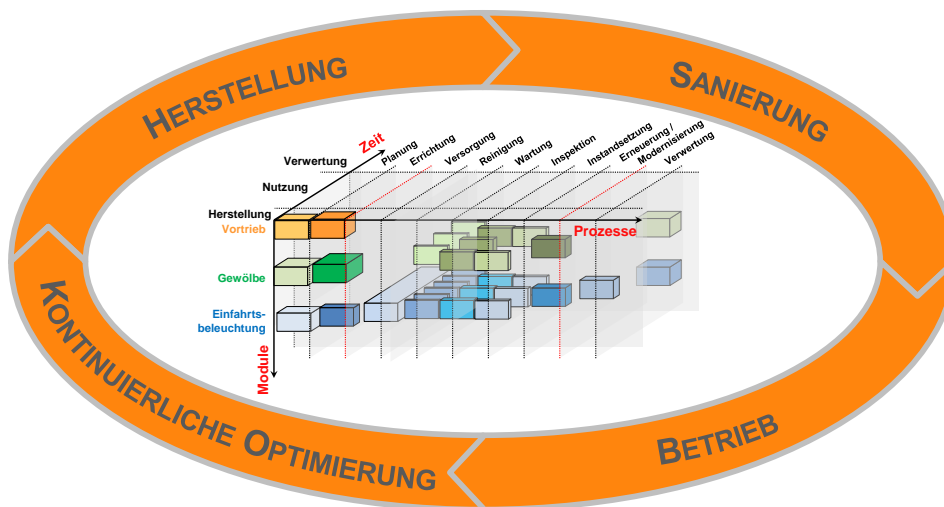


Abbildung 6.21: Anwendungsspektrum des Modularen Prozessmodells

7 Methodik zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten

Das Leitziel der vorliegenden Arbeit umfasst die ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken der Straßeninfrastruktur. Dazu notwendig ist ein eigenständiges Verfahren zur transparenten und nachvollziehbaren Bestimmung der Lebenszykluskosten sowie zur gezielten Generierung und Umsetzung von Substitutions- und Optimierungspotentialen. Ausgangsbasis ist das im vorangegangenen Abs. 6 entwickelte Modulare Prozessmodell mit seiner hierarchisch-modularen Systemarchitektur.

Die Methodik ist so aufzubauen, dass Änderungen und Anpassungen, sowohl für den Untersuchungsrahmen und der Zielstellung als auch in der Ausgestaltung der Module, jederzeit umgesetzt werden können. Die Ausrichtung soll dabei nicht nur auf die Planung von zukünftigen Bauwerken beschränkt sein. Vielmehr soll eine Anwendbarkeit über alle Lebensphasen hinweg dazu beitragen, den Prozess der kontinuierlichen Verbesserung anzustoßen und umzusetzen.

In Abbildung 7.1 ist der schematische Ablauf zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken dargestellt. Kernelement der Methodik ist das Modulare Prozessmodell. Die einzelnen Teilschritte im Verfahrensablauf werden in den nachfolgenden Abschnitten eingehend erläutert.

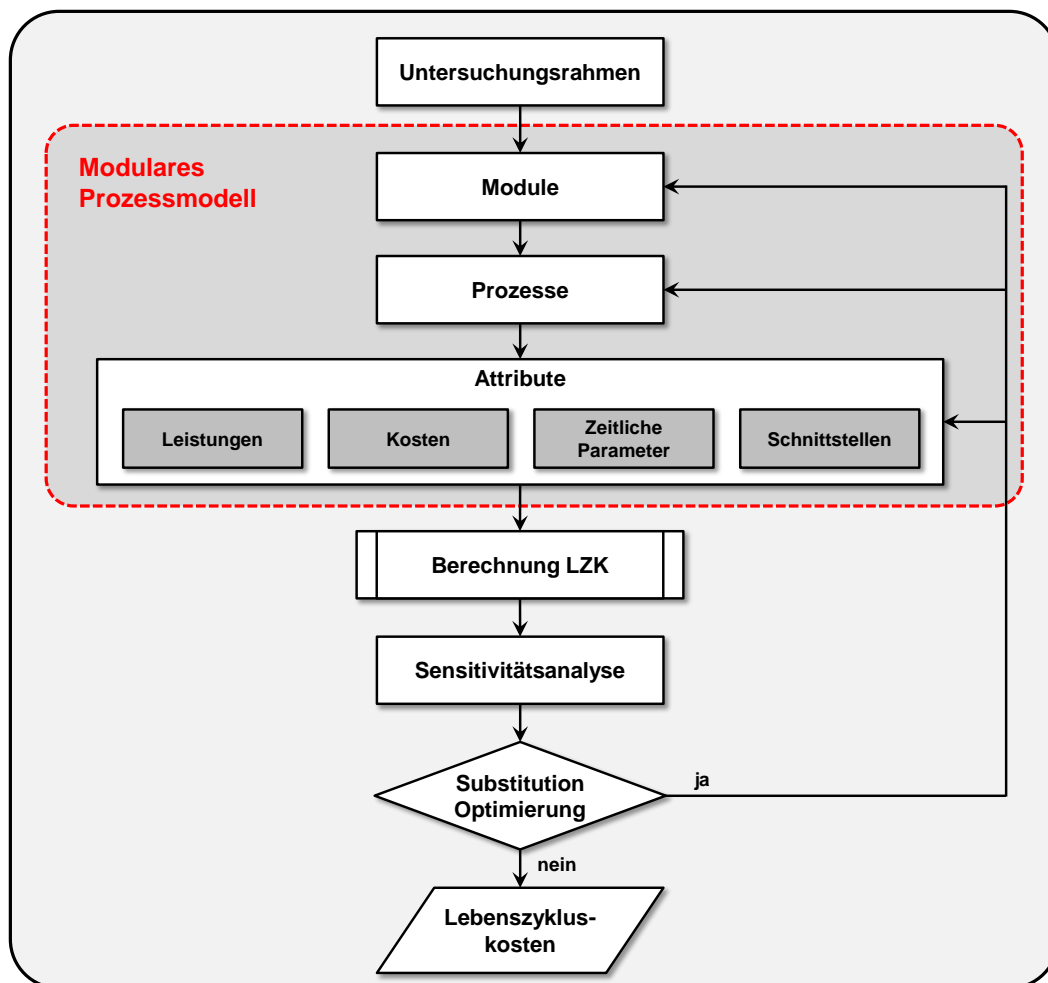


Abbildung 7.1: Methodik zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken⁵⁰⁰

⁵⁰⁰ in Anlehnung an ENGELHARDT, SCHWARZ, THEWES (2014), S. 597

7.1 Bestimmung des Untersuchungsrahmens

Zur Abgrenzung des Untersuchungsrahmens ist es erforderlich, den Untersuchungsgegenstand, die Ausprägung des Untersuchungsumfangs, die verfolgte Zielstellung sowie den zeitlichen Betrachtungshorizont im Vorfeld festzulegen (Abbildung 7.2).⁵⁰¹

Ausgehend vom Untersuchungsgegenstand, der neben der Ausrichtung auf den Neubau von Tunnelbauwerken auch Betrachtungen für Bestandsbauwerke, deren Umbau bzw. Instandsetzung oder Modernisierung umfassen kann, erfolgt die Bestimmung der Ausprägung des Untersuchungsrahmens. Dazu ist auf Basis der vorliegenden Planungs- bzw. Informationstiefe sowie der verfolgten Zielstellung, die Betrachtungstiefe im Einzelnen festzulegen. Entsprechend dem Modularen Prozessmodell kann der Umfang vom einzelnen Modul bis zum vollständigen Tunnelbauwerk sämtliche Ausprägung umfassen. Auch vertiefte Untersuchungen singulärer Bereiche, bei einer gleichzeitigen übergeordneten Betrachtung weiterer Einheiten, sind mit der hierarchisch-modularen Systemarchitektur umsetzbar (Abbildung 6.20).

Die Festlegung des mit der Untersuchung verfolgten Ziels, beispielsweise einer Lebenszykluskostenrechnung zur Gesamtkostenoptimierung oder zur Budgetplanung, prägt wesentlich das weitere Vorgehen. Insbesondere die Bestimmung des relevanten Zeithorizonts für den Untersuchungsrahmen wird dadurch entscheidend beeinflusst.

Für eine Gegenüberstellung von Bauwerksvarianten ist bei der Bestimmung des Untersuchungsrahmens grundsätzlich auf eine Vergleichbarkeit zu achten. Diese ist beispielsweise über ein äquivalentes Sicherheitsniveau, identische Leistungsklassen, vergleichbare Eingangsgrößen (z. B. Verkehrsaufkommen, zul. Höchstgeschwindigkeit usw.) oder eine vollumfängliche Aufgabenerfüllung zu gewährleisten.

Untersuchungsgegenstand	Ausprägung	Zielstellung	Zeitraumen
<ul style="list-style-type: none"> • Neubau • Bestand • Umbau • Instandsetzung • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Bauwerk • System • Baugruppe • Modul • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • Kostenoptimierung • Kostenvergleich • Budgetplanung • Benchmarking • ... 	<ul style="list-style-type: none"> • 100 Jahre • 25 Jahre • 10 Jahre • 2 Jahre • ...
Untersuchungsrahmen			

Abbildung 7.2: Abgrenzung des Untersuchungsrahmens

7.2 Ausgestaltung des Modularen Prozessmodells

Ausgehend vom Untersuchungsrahmen ist das Modulare Prozessmodell vollumfänglich auszugestalten. Dazu sind die für die Untersuchung relevanten Module bzw. Elemente (Systeme, Baugruppen usw.) zu bestimmen. Die Entwicklung und Abgrenzung der Module erfolgt mit der unter Abs. 6.2 vorgestellten Vorgehensweise. Dabei wesentlich sind die Kriterien der Unabhängigkeit und Integrität.

⁵⁰¹ Eine erste exemplarische Bestimmung des Untersuchungsrahmens erfolgt in Abs. 10.2.1.

Den identifizierten Modulen bzw. den übergeordneten Strukturebenen sind die relevanten Prozesse separat zuzuweisen, so dass eine konsistente und strukturierte Zuordnung der einzelnen Attribute möglich wird.⁵⁰²

Die Ausgestaltung der Module mit einzelnen Attributen vervollständigt das Modulare Prozessmodell (Abs. 6.2.3). Die dazu erforderlichen Eingangsgrößen für Leistungen, Kosten, Zeitliche Parameter sowie interne und externe Schnittstellen gilt es in deterministischer Form zu bestimmen. Bei Rückgriff auf bereits entwickelte Module, hat eine Überprüfung und Anpassung der Schnittstellen und Attributausgestaltung auf die vorliegenden Randbedingungen zu erfolgen.⁵⁰³

7.3 Berechnung der Lebenszykluskosten

Die Berechnung der Lebenszykluskosten basiert auf finanzmathematischen Ansätzen aus der Investitionsrechnung.⁵⁰⁴ Die zur Verfügung stehenden statischen bzw. dynamischen Berechnungsverfahren differieren in der Berücksichtigung des zeitlichen Anfalls monetärer Größen. Zur Erfassung der unterschiedlichen Wertigkeit von zeitlich variierenden Kosten ist für die Lebenszykluskostenrechnung auf dynamische Rechenverfahren zurückzugreifen. Insbesondere vor dem Hintergrund, dass eine Saldierung zeitlich differierender Kosten aus finanzmathematischer Sicht nur möglich ist, sofern durch Anwendung der Zinsseszinsrechnung, die Kosten auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt auf- bzw. abgezinst werden.⁵⁰⁵

Durch die vollumfängliche Bestimmung der Attribute aller Module lässt das Modulare Prozessmodell dem Anwender die Möglichkeit offen, das finanzmathematische Rechenverfahren nach eigenen Kriterien zu wählen. Neben der Kapitalwertmethode ist alternativ auch eine Umsetzung eines Vollständigen Finanzplans oder der Methode des internen Zinssatzes möglich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt eine Konzentration auf die Kapitalwertmethode. Dies ist dadurch begründet, dass eine Vielzahl der bisher veröffentlichten Lebenszykluskostenmodelle, darunter auch die normativen Modelle nach ISO/FDIS 15686-5 und DIN 60300-3-3, die Anwendung der Kapitalwertmethode zur Bestimmung der Lebenszykluskosten präferieren.⁵⁰⁶

Zielgröße bei der Kapitalwertmethode ist der Kapitalwert. Er dient als Vergleichswert aller zu bewertenden Alternativen. Der zur Bestimmung des Kapitalwertes erforderliche Betrachtungszeitpunkt ist, entsprechend den Empfehlungen des Bundesministeriums der Finanzen, mit dem Entscheidungszeitpunkt gleichzusetzen.⁵⁰⁷ Alle Zahlungen sind auf diesen Zeitpunkt hin auf- bzw. abzuzinsen (= Barwertbildung). Für die Investitionskosten (Herstellung und Planung) wird allgemein üblich keine Ab- bzw. Aufzinsung vorgenommen. Deren Anfallszeitpunkt wird per Definition dem Entscheidungszeitpunkt gleichgestellt. Dies liegt dem Ansatz zugrunde, dass die Investitionskosten als einmalige Kosten angesehen werden und die Dauer der Herstellung vernachlässigt wird. Daraus folgt, dass der Betrachtungszeitpunkt und der Zeitpunkt der Inbetriebnahme als identisch anzusehen sind. Die Folgekosten sind auf diesen Zeitpunkt hin abzuzinsen (Abbildung 7.3).

⁵⁰² Unter Abs. 6.3 wurden die wesentlichen Prozesse identifiziert.

⁵⁰³ Eine erste exemplarische Ausgestaltung von Modulen wird in Abs. 10.2.2 vorgenommen. Hierfür werden Modulblätter vorgestellt, die zur Erhebung und Strukturierung der notwendigen Parameter dienen.

⁵⁰⁴ siehe Abs. 3.1.4 bzw. 3.1.5

⁵⁰⁵ vgl. CARSTENSEN (2008), S. 34

⁵⁰⁶ vgl. ISO/FDIS 15686-5 (2008), S. 26; DIN EN 60300-3-3 (2005), S. 27; siehe auch Abs. 3.1.5

⁵⁰⁷ vgl. BMF (2011), S. 15

Alternativ können der Betrachtungszeitpunkt sowie das Vorgehen der Auf- bzw. Abzinsung von den Entscheidungsträgern eigenständig festgelegt werden. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit ist jedoch die Einhaltung eines kongruenten Vorgehens für alle Planungsvarianten dringend geboten.

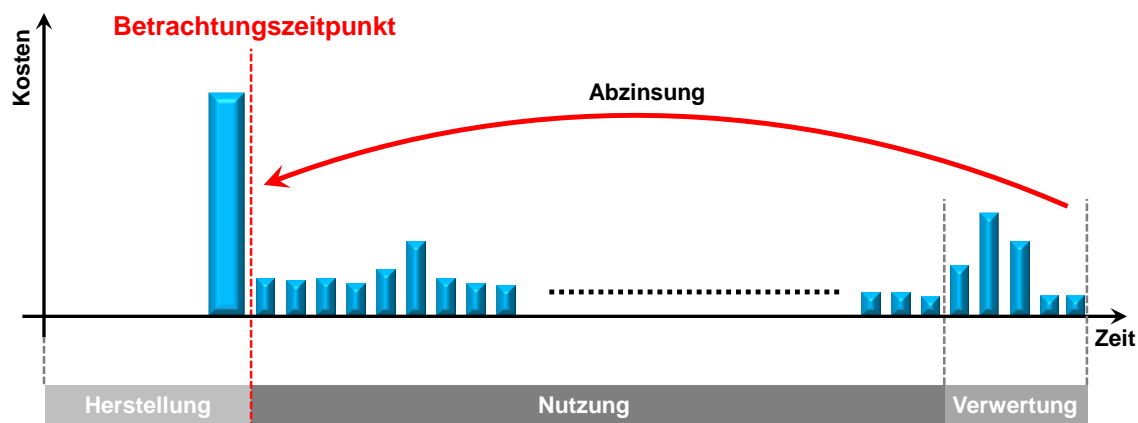


Abbildung 7.3: Berücksichtigung zeitlicher Gewichtung von Kosten durch Auf- bzw. Abzinsung auf den Betrachtungszeitpunkt

Zentrale Größe bei allen dynamischen Rechenmodellen ist neben den Kosten und deren Anfallszeitpunkt der Kalkulationszinssatz. Durch diesen wird der Barwert der zukünftigen Kostenelemente wesentlich beeinflusst. Der Zinssatz beschreibt die relative Gewichtung der Kosten aus unterschiedlichen Zeitpunkten zueinander. Ein hoher Zinssatz begünstigt Alternativen mit ausgeprägten Folge- und geringen Investitionskosten. Umgekehrt steigt der Einfluss von Folgekosten durch einen niedrigen Zinssatz. Zur Abschätzung der Relevanz der Folgekosten ist angeraten, neben einer Variante basierend auf dem gewählten Kalkulationszinssatz, eine Alternativbewertung ohne Auf- bzw. Abzinsung (Kalkulationszinssatz = 0) vorzunehmen. Dies bietet die Möglichkeit, entsprechend dem Grundgedanken der Nachhaltigkeit, die finanzielle Belastung nachfolgender Generationen abschätzen und beeinflussen zu können.⁵⁰⁸

Der Kalkulationszinssatz ist die Ausgangsbasis für die Vergleichbarkeit der Zahlungsströme sämtlicher Ausführungsalternativen. Der Ansatz des „richtigen“ Kalkulationszinssatzes wird in der Finanzwissenschaft bis heute diskutiert.⁵⁰⁹ Eine allgemeingültige Bestimmung ist aufgrund der breiten Anwendbarkeit der Investitionsrechnung nicht möglich. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es nicht, hierfür einen geeigneten Ansatz zu bestimmen. Es wird vielmehr dem Anwender des Lebenszykluskostenmodells anheimgestellt, diesen Zinssatz nach den vorliegenden Projektspezifikationen, der verfolgten Zielstellung bzw. normativen oder rechtlichen Vorgaben festzulegen. Alternativ kann auf vorbestimmte Werte zurückgegriffen werden. Beispielsweise kann entsprechend der „Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen“ des Bundesministerium für Finanzen (BMF) für einzelwirtschaftliche Maßnahmen der vom BMF mittels Rundschreiben herausgegebene Zinssatz Anwendung finden.⁵¹⁰

⁵⁰⁸ siehe hierzu auch ENGELHARDT (2014), S. 554

⁵⁰⁹ vgl. u. a. GÖTZE (2008), S. 88 ff.; CARSTENSEN (2008), S. 38 ff.; FMK (2004), S. 21 ff.; OTT (2011), S. 83

⁵¹⁰ vgl. BMF (2011), S. 7

Aktuell beträgt der nominale Kalkulationszinssatz 2,3% (Stand 09.05.2014). [vgl. BMF (2013)B, S. 4]

Die gewählte Strukturierung ermöglicht neben einer Aggregation der Kosten für das Gesamtbauwerk auch eine system-, baugruppen- und modulweise Auswertung. Erweiternd kann durch Zusammenführung gleichartiger Prozesse oder übereinstimmender Lebensphasen eine prozess- bzw. phasenbezogene Auswertung erfolgen (Abbildung 7.4 bis Abbildung 7.6).⁵¹¹

Bestimmung der Lebenszykluskosten über den gesamten Untersuchungsrahmen

$$KW = LCC = \sum_m \sum_p \sum_{t=0}^T K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.1)$$

Dabei gilt:

KW	=	Kapitalwert = Lebenszykluskosten des gesamten Untersuchungsrahmens
$K_{m,p,t}$	=	Kosten des Moduls m, resultierend aus dem Prozess p, zum Zeitpunkt t_n
m	=	Modul
p	=	Prozess
t_0	=	Betrachtungszeitpunkt
t_n	=	Anfallszeitpunkt der Kosten
T	=	Zeitpunkt, zu dem letztmalig Kosten anfallen
t	=	$t_n - t_0$ = Periode zur Abzinsung
q^{-t}	=	$(1+i)^{-t}$ = Abzinsungsfaktor
i	=	Kalkulationszinssatz

Modulbezogene Aggregation

$$KW_m = \sum_p \sum_{t=0}^T K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.2)$$

Dabei gilt:

KW_m	=	Kapitalwert des Moduls m
--------	---	--------------------------

Eine baugruppen- bzw. systembezogene Aggregation erfolgt durch Aufsummierung der der Kapitalwerte der jeweils zugehörigen Module.

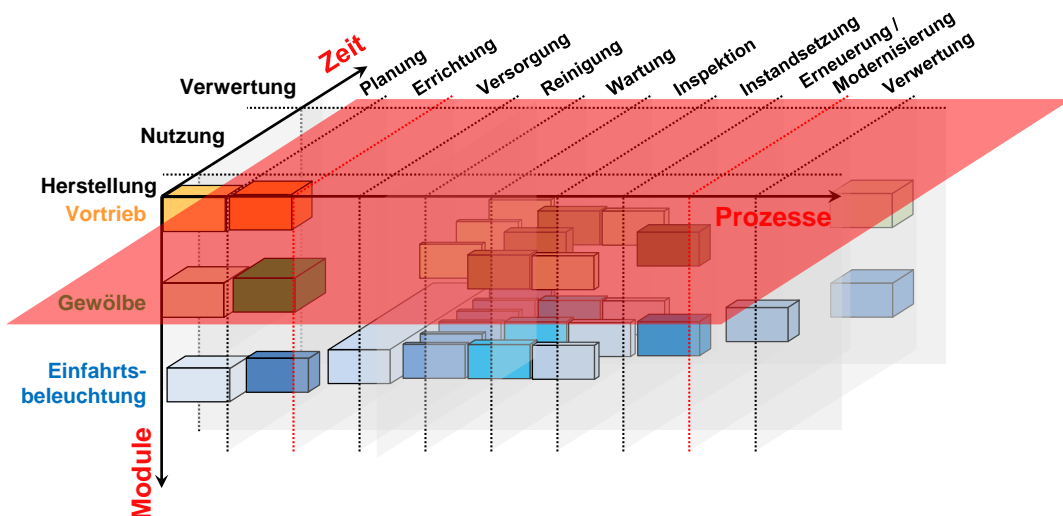


Abbildung 7.4: Modul-, baugruppen- oder systembezogene Aggregation der Kosten

⁵¹¹ In Abs. 10.2.3 wurde beispielhaft eine entsprechende Auswertung der Lebenszykluskosten vorgenommen.

Prozessbezogene Aggregation

$$KW_p = \sum_m \sum_{t=0}^T K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.3)$$

$$KW_{m,p} = \sum_{t=0}^T K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.4)$$

Dabei gilt:

- KW_p = Kapitalwert des gesamten Untersuchungsrahmens, für den Prozess p
 $KW_{m,p}$ = Kapitalwert des Moduls m, für den Prozess p

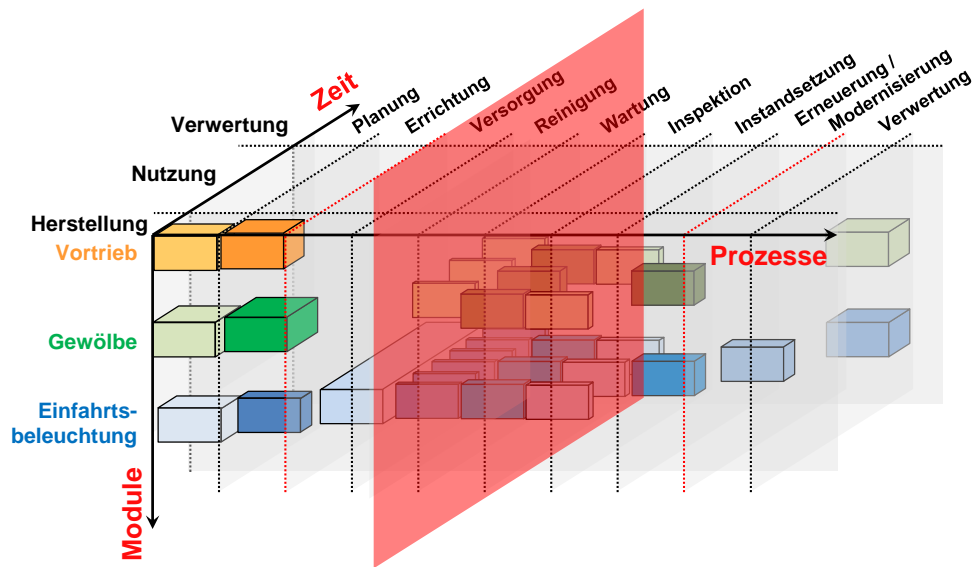


Abbildung 7.5: Prozessbezogene Aggregation der Kosten

Phasenbezogene Aggregation

$$KW_{tp} = \sum_m \sum_p \sum_{t=t_{xA}}^{t_{xE}} K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.5)$$

$$KW_{m,tp} = \sum_p \sum_{t=t_{xA}}^{t_{xE}} K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.6)$$

$$KW_{p,tp} = \sum_m \sum_{t=t_{xA}}^{t_{xE}} K_{m,p,t} \cdot q^{-t} \quad (7.7)$$

Dabei gilt:

- KW_{tp} = Kapitalwert des gesamten Untersuchungsrahmens, für die Phase tp
 $KW_{m,tp}$ = Kapitalwert des Moduls m, für die Phase tp
 $KW_{p,tp}$ = Kapitalwert des Prozesses p, für die Phase tp
 t_{xA} = Zeitpunkt – Beginn der Lebensphase x
 t_{xE} = Zeitpunkt – Ende der Lebensphase x

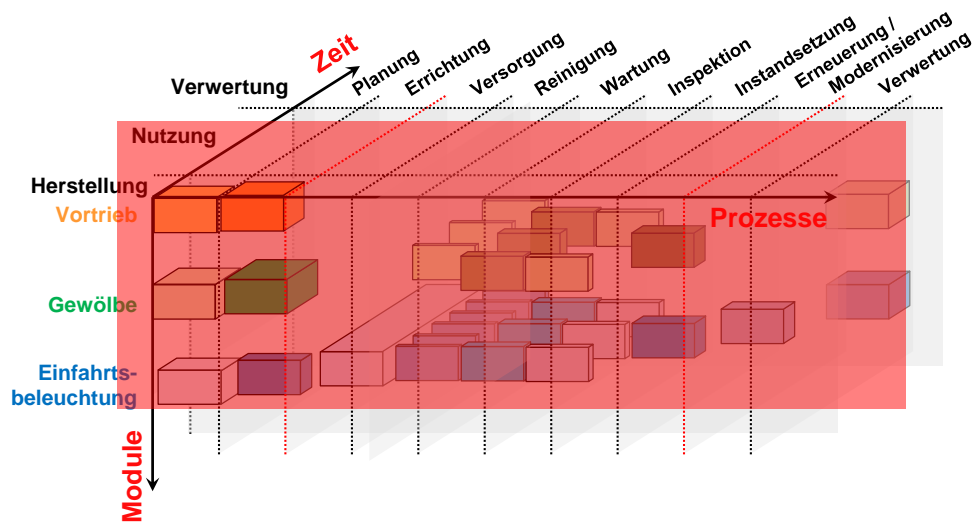


Abbildung 7.6: Phasenbezogene Aggregation der Kosten

7.4 Sensitivitätsanalyse

Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems und der Vielzahl an Parametern, die die Lebenszykluskosten bestimmen, ist vor der eigentlichen Optimierung Kenntnis über die Kostentreiber sowie die Sensitivität der Ergebnisse zu erlangen. Hierdurch wird eine Eingrenzung auf für die Optimierung relevanten Größen ermöglicht. Gleichzeitig dient die Sensitivitätsanalyse der Risikoabschätzung hinsichtlich der prognostizierten Kenngrößen.

Die Strukturierung und die daraus resultierende Transparenz des Modularen Prozessmodells ermöglichen eine ungehinderte Identifizierung der wesentlichen Kostentreiber. Zur Veranschaulichung kann eine modul- bzw. prozessweise Rangfolgenbildung vorgenommen werden (beispielhafte Darstellung – Abbildung 7.7).

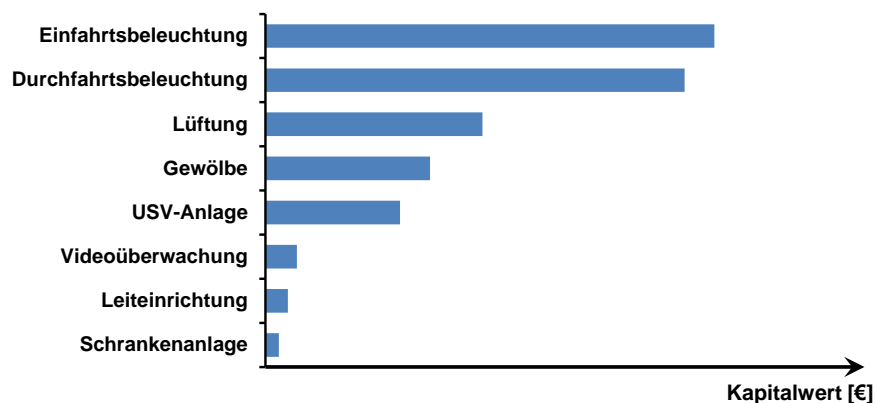


Abbildung 7.7: Rangfolgenbildung zur Identifikation signifikanter Kostengrößen

Zur Bestimmung der Sensitivität der Ergebnisse sind mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen die signifikanten Einflussparameter zu bestimmen. Durch Anwendung der Ceteris-paribus-Klausel⁵¹² werden die Zusammenhänge zwischen Eingangsgröße und Ergebnis analysiert und durch Darstellung in Diagrammen visualisiert (beispielhaft in Abbildung 7.8). Die Variation der Eingangsgrößen hat möglichst mit nachvollziehbaren, realistischen Merkmalsausprägungen zu erfolgen.

⁵¹² Durch Veränderung einer Eingangsgröße, bei gleichzeitiger Konstanz aller weiteren Größen, wird der Einfluss auf die Zielgröße untersucht. [vgl. Wöhe (2000), S. 34]

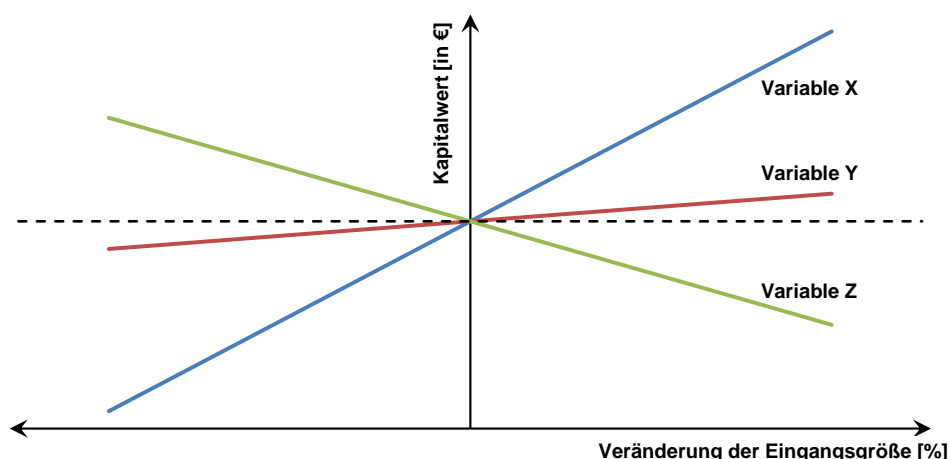


Abbildung 7.8: Darstellung der Sensitivität des Kapitalwertes

Erweiternd können zur Bestimmung der Sensitivität Szenarienanalysen, beispielsweise in Form von Bestcase- bzw. Worstcase-Szenarien, durchgeführt werden. Hierbei werden mehrere Parameter gleichzeitig in ihrer Ausprägung verändert und deren Auswirkungen untersucht.⁵¹³

In Kenntnis der wesentlichen Einflussgrößen und maßgeblichen Kostentreibern besteht für den Anwender die Möglichkeit, den nachfolgenden Optimierungsprozess gezielt anzugehen.⁵¹⁴ Das weitere Vorgehen kann sich dabei auf die aussichtsreichsten Ansätze beschränken, um so den Aufwand für die Optimierungen in einem vertretbaren Rahmen zu halten.⁵¹⁵

7.5 Identifikation von Substitutionspotentialen und ökonomische Optimierung

Ausgehend von den vorangegangenen Analysen sind im weiteren Schritt gezielt Substitutions- und Optimierungspotentiale abzuleiten und umzusetzen. Dies geschieht auf Basis der hierarchisch-modularen Struktur, den mit den Modulen bestimmten Schnittstellen sowie den wesentlichen Einflussparametern. Die mit der Optimierung verfolgte Zielstellung kann dabei von einzelnen Einheiten (Prozess, Modul, Baugruppe oder System) bis hin zum gesamten Bauwerk alle Ausprägungen der Systemarchitektur umfassen. Die Modularität ermöglicht eine gezielte und eigenständige Optimierung jedes einzelnen Moduls. Neben der Anpassung von Modulen, kann eine Optimierung der Lebenszykluskosten auch durch Einbeziehung ergänzender Module bzw. Prozesse erreicht werden (siehe Beispiel). Diese sind aufgrund der verwendeten Systemstruktur leicht zu integrieren. Auch ein Austausch von Modulen, Prozessen oder deren Attribute ist ohne größeren Aufwand umsetzbar. Einzig die aus den verschiedenen Eingriffen resultierenden Auswirkungen auf andere Module sind mit Hilfe der Schnittstellen und Einflussgrößen festzustellen, abzuschätzen und in den Attributen der jeweiligen Module zu berücksichtigen (Abbildung 7.9). Das bedeutet, dass neben der Eigenständigkeit der Module, das Bauwerk bzw. der Untersuchungsrahmen ganzheitlich in die Betrachtungen einzubeziehen ist.

⁵¹³ vgl. FECK (2007), S. 17

⁵¹⁴ Die Generierung von Optimierungspotentialen hinsichtlich der Lebenszykluskosten ist nur möglich, sofern vorab die relevanten Einflussgrößen und die wesentlichen Zusammenhänge identifiziert und berücksichtigt wurden. [vgl. BECKER (1986), S. 33 f.]

⁵¹⁵ Eine Anwendung der Sensitivitätsanalyse und der Rangfolgebildung zur Eingrenzung der Optimierungsansätze wurde beispielhaft in Abs. 10.2.4 vorgenommen.

Beispiel: Aufbringen einer Beschichtung auf die Innenschale

Aus den erhobenen Schnittstellen kann abgeleitet werden, dass durch Aufbringen einer Beschichtung, die Dauerhaftigkeit der Tunnelinnenschale positiv beeinflusst wird. Dies führt dazu, dass die Aufwendungen für die Instandsetzung geringer ausfallen. Gleichzeitig wird durch die mit einer Beschichtung zu erzielende Aufhellung der Tunnelwände, eine Reduzierung des Energieverbrauchs und damit eine Verkleinerung der Beleuchtungsanlage möglich. Durch den reduzierten Energiebedarf wiederum kann die USV-Anlage kleiner dimensioniert werden (Abbildung 7.9).

Die Attribute der betroffenen Module sind den geänderten Parametern anzupassen. Die Mehrkosten aus der Beschichtung sowie die daraus resultierenden Erneuerungskosten sind den Einsparungen, z. B. bei den Instandsetzungskosten der Innenschale, den Beleuchtungskosten und den Anschaffungskosten der USV-Anlage, gegenüberzustellen.

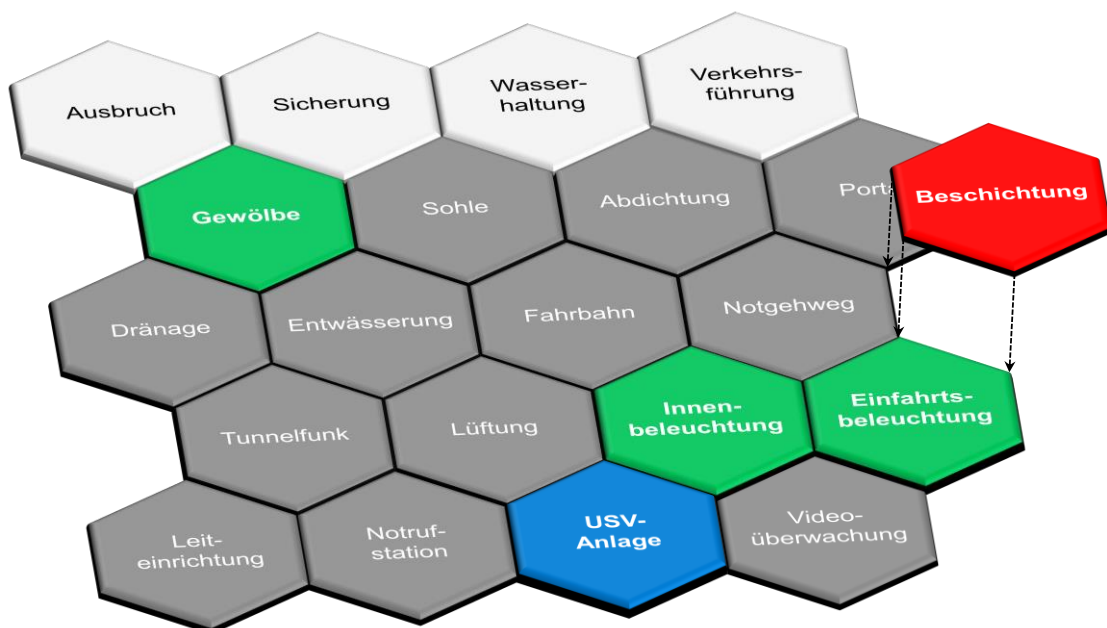


Abbildung 7.9: Aufzeigen der betroffenen Module (grün bzw. blau) infolge der Änderung eines Moduls (rot) unter Berücksichtigung der Schnittstellen

Das Wissen über die gegenseitigen Abhängigkeiten der Module ermöglicht die Optimierung der Lebenszykluskosten durch Umsetzung von Substitutionspotentialen. Dabei ist unter dem Begriff „Substitution“ das aus der Volkswirtschaftslehre bekannte Prinzip „(...) der Ersetzung eines wirtschaftlichen Gutes durch ein (...) billigeres Gut“ zu verstehen.⁵¹⁶ Das mit einer Substitution angestrebte Ziel umfasst eine Reduzierung der Gesamtkosten bei mindestens gleichbleibender Funktionalität des Gesamtbauwerkes.⁵¹⁷

Unter Einbeziehung von Erst- und Folgekosten differenzieren SCHUB & STARK drei grundsätzliche Ansätze zur Substitution für die Optimierung der Lebenszykluskosten:⁵¹⁸

1. Erstkosten werden durch Erstkosten ersetzt.
2. Folgekosten werden durch Folgekosten ersetzt.
3. Erstkosten werden durch Folgekosten ersetzt bzw. umgekehrt.

⁵¹⁶ SCHUB, STARK (1987), S. 60

⁵¹⁷ vgl. BORCHARDT (1983), S. 61; RECKTENWALD (1983), S. 627 f.

⁵¹⁸ vgl. SCHUB, STARK (1987), S. 60

Möglichkeit drei lässt sich dabei in zwei weitere Ansätze aufteilen, so dass grundsätzlich vier Varianten zu unterscheiden sind (Abbildung 7.10).⁵¹⁹

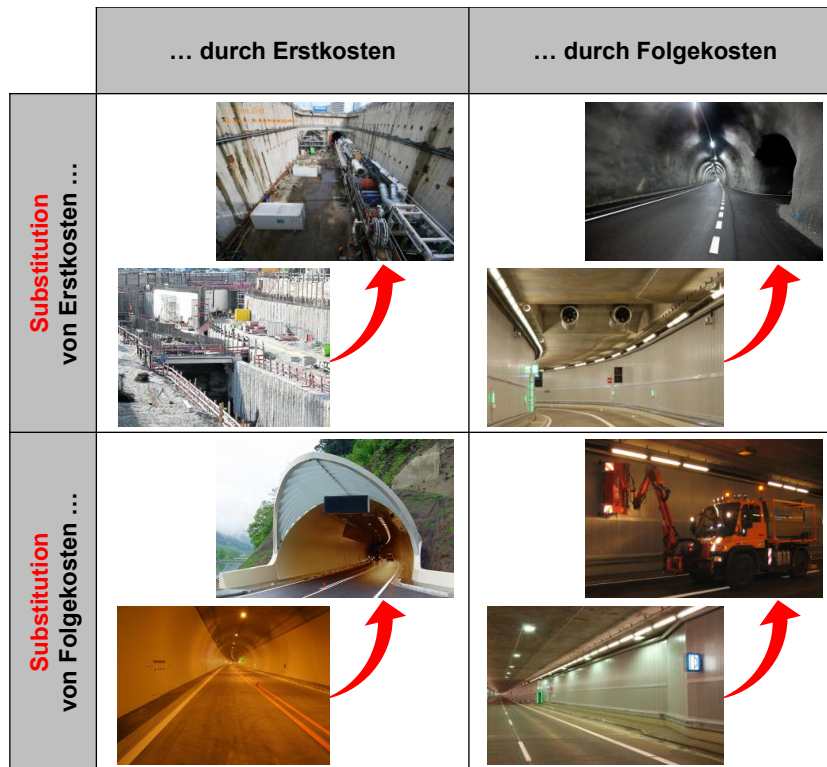


Abbildung 7.10: Grundsätzliche Möglichkeiten der Substitution⁵²⁰

Zur Umsetzung einer Optimierung ist, ausgehend von den vier Varianten der Substitution, die Kombination mit den geringsten Gesamtkosten zu identifizieren. Dabei wesentlich ist auch an dieser Stelle die Einbeziehung der internen und externen Schnittstellen, so dass Einflüsse auf andere Module Berücksichtigung finden.

Mit der Generierung von Optimierungspotentialen hat eine Anpassung der Module in Umfang und Ausgestaltung (Module, Prozesse und Attribute) zu erfolgen. Anschließend sind zur Gegenüberstellung der Varianten, die Lebenszykluskosten für die jeweilige Ausgestaltung neu zu berechnen. Um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen (Optimierungs-) Varianten zu gewährleisten, ist die Einhaltung eines konsistenten Untersuchungsrahmens wesentlich.⁵²¹ Dies bedeutet, dass alle zu untersuchenden Varianten hinsichtlich eines einheitlichen bzw. vergleichbaren technischen, sicherheitstechnischen und funktionalen Niveaus abzugrenzen sind.⁵²² Abschließend ist die aus Sicht des Anwenders vorteilhafteste Variante, mit den geringsten Lebenszykluskosten zu bestimmen.

⁵¹⁹ siehe hierzu u. a. VOGT (2012), S. 68 oder auch THEWES ET AL. (2013)A, S. 244 f.

⁵²⁰ Erläuterung der in Abbildung 7.10 beispielhaften dargestellten Substitutionsvarianten:

- Variante 1: Erst- durch Erstkosten: Wechsel der Bauweise – von offener zu geschlossener Bauweise.
- Variante 2: Erst- durch Folgekosten: Reduzierung der Herstellkosten (Ausbau Spritzbeton anstelle einer Ortbetoninnenschale) mit dem Resultat höherer Folgekosten (häufigere Instandsetzung).
- Variante 3: Folge- durch Erstkosten: Reduzierung der Energiekosten für Beleuchtung durch den Bau von Sonnensegeln in den Portalbereichen (höhere Herstellkosten).
- Variante 4: Folge- durch Folgekosten: Reduzierung der Beleuchtungskosten durch häufigere Reinigung der Tunnelwände (höhere Reinigungskosten).

⁵²¹ vgl. ENGELHARDT (2014), S. 556

⁵²² vgl. ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013), S. 474

Das ökonomische Optimum ist aufgrund der Komplexität des Gesamtbauwerkes (Ingenieurbauwerk und Technische Anlage)⁵²³ aus verschiedenen Gründen nicht bzw. nur mit hohem Aufwand umsetzbar. Zielführender ist die Umsetzung signifikanter Ansätze bzw. einfach zu realisierender Optimierungen.

7.6 Feststellung der Lebenszykluskosten

Mit Abschluss der Optimierungen werden die Lebenszykluskosten der optimierten Variante bestimmt (Abbildung 7.11). Der dabei mit der Methodik analysierte Untersuchungsrahmen dient anschließend als Grundlage zur Planung und Umsetzung des Tunnelbauwerkes bzw. der geplanten Optimierungsmaßnahmen für Bestandsbauwerke. Die ermittelten Lebenszykluskosten und deren Struktur bilden die Ausgangsbasis für ein gezieltes Kostencontrolling.

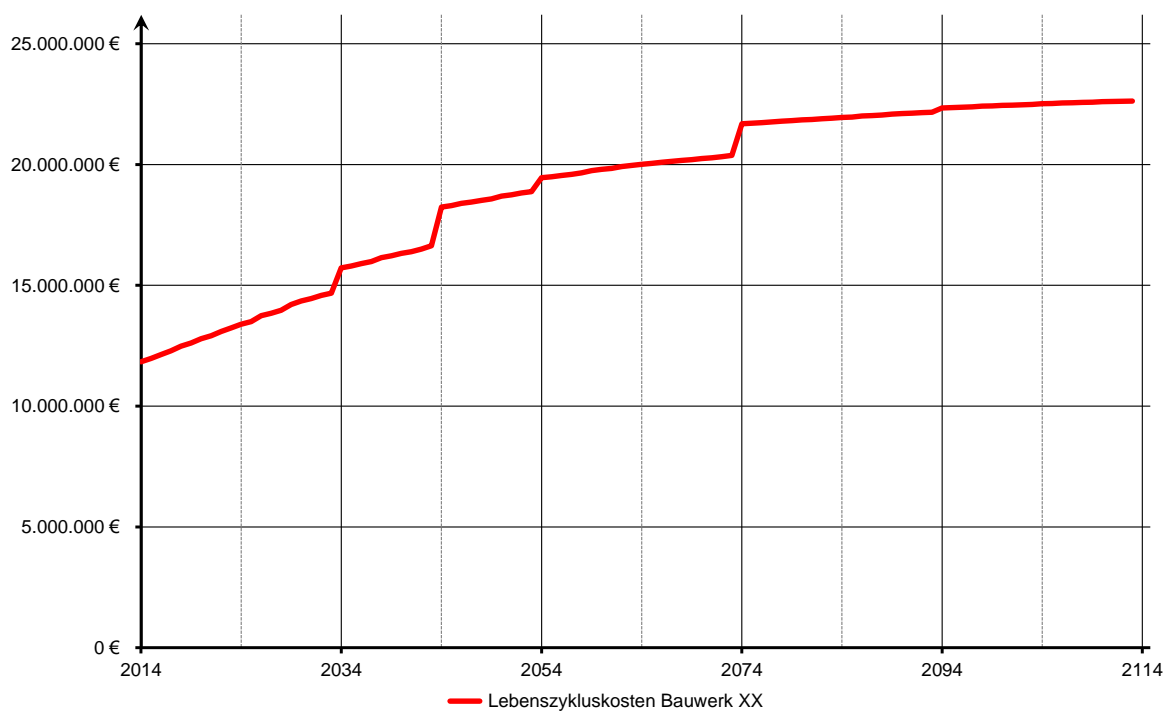


Abbildung 7.11: Verlauf der Lebenszykluskosten (beispielhafte Darstellung)

⁵²³ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 243 ff.

8 Modellerweiterung zur Berücksichtigung probabilistischer Eingangsgrößen

Das bisherige Vorgehen zur Bestimmung der Lebenszykluskosten mit dem Modularen Prozessmodell beruht auf dem Ansatz, dass sämtliche Eingangsgrößen bzw. Attribute in deterministischer Form vorliegen. Die modellhafte Abbildung zukünftiger Ereignisse bedingt jedoch eine Prognose über Ausprägung und Eintreten der einzelnen Attribute. Durch die Zukunftsbezogenheit sind diese Werte nicht exakt bestimmbar. Prognosen sind somit per se mit Unschärfen verbunden.⁵²⁴ Die hieraus resultierenden Unsicherheiten in den Eingangsgrößen gilt es für die Lebenszykluskostenrechnung zu erfassen und im Entscheidungsprozess zu berücksichtigen. Hierfür ist auf probabilistische Methoden zurückzugreifen, um „(...) den tatsächlichen Wissensstand über Risiken und Kosten zu jeder Projektphase mittels der Verteilungsdichten abzubilden“.⁵²⁵ Die dazu notwendige Risikoanalyse setzt voraus, dass hinsichtlich der unsicheren Eingangsgrößen Aussagen über deren Wahrscheinlichkeit (Ausprägung und Eintreten) getroffen werden können – unabhängig ob subjektiv oder objektiv.⁵²⁶ Die risikobehafteten Werte gilt es zu identifizieren.

Für die Einbeziehung entsprechender probabilistischer Eingangsgrößen ist das Modulare Prozessmodell zu erweitern. Darüber hinaus ist eine eigenständige Methodik zu entwickeln, die eine Risikoanalyse zur Bestimmung der Lebenszykluskosten implementiert. Ziel ist es, ausgehend von den deterministischen und probabilistischen Eingangsgrößen, Aussagen über das Wahrscheinlichkeitsverhalten und Risikopotential der Lebenszykluskosten abzuleiten.⁵²⁷

8.1 Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Lebenszykluskostenrechnung

Für die gezielte Bestimmung der Lebenszykluskosten, unter Berücksichtigung von Unsicherheiten, ist auf die Risikoanalyse zurückzugreifen (Abs. 3.2). Diese bietet die Möglichkeit, Wahrscheinlichkeiten zu bestimmen, in welchen Grenzen sich der Zielwert einstellen wird. Analytische Verfahren sind aufgrund der Komplexität von Tunnelbauwerken, respektive deren Kostenstrukturen, hierfür ebenso wenig geeignet wie Vollenumerationen. Simulative Verfahren bieten eine anwenderfreundliche Lösung, Risiken komplexer Systeme zu aggregieren und für die Entscheidungsfindung zu veranschaulichen.⁵²⁸

Die Einbindung der Risikoanalyse in die Methodik zur Bestimmung der Lebenszykluskosten erfolgt unter Rückgriff auf die Monte-Carlo-Simulation als numerisches Simulationsverfahren.⁵²⁹ Der Vorteil dabei ist, dass auf bereits existierende, deterministische Rechenmodelle – ohne weitere Anpassung – zurückgegriffen werden kann.⁵³⁰ Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass das Modulare Prozessmodell lediglich durch die Integration probabilistischer Eingangsgrößen erweitert werden muss. Eine Umgestaltung ist nicht erforderlich. Die entwickelten (Kosten-)Strukturen können beibehalten werden. Die Bestimmung der probabilistischen Eingangsgrößen ist somit der wesentliche Schritt zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Lebenszykluskostenrechnung.⁵³¹

⁵²⁴ vgl. SANDER (2012), S. 19 f.

⁵²⁵ SANDER (2012), S. 23

⁵²⁶ vgl. JÖCKEL, PFLAUMER (1981), S. B40

⁵²⁷ vgl. JÖCKEL, PFLAUMER (1981), S. B40; SANDER (2012), S. 26

⁵²⁸ siehe Abs. 3.2.2.3

⁵²⁹ Eine eingehende Erläuterung der Monte-Carlo-Simulation ist Abs. 3.3 zu entnehmen.

⁵³⁰ vgl. HILDENBRAND (1988), S. 49

⁵³¹ Eine beispielhafte Anwendung findet die Risikoanalyse in Abs. 10.3 zur Entscheidungsfindung.

8.2 Unsichere Größen im Modularen Prozessmodell

Zur Umsetzung der Risikoanalyse gilt es im ersten Schritt, die unsicheren Größen im Lebenszykluskostenmodell zu identifizieren. Dabei können aufgrund der vorgenommenen Modellierung eines realen Systems grundsätzlich alle Parameter mit Unsicherheiten behaftet sein. GUPTA ET AL. differenzieren dabei drei Kategorien von Unsicherheitsquellen:⁵³²

- Modellparameter
- Modellstrukturen
- Eingangsgrößen

Unsicherheiten in den **Modellparametern** begründen sich in Ungenauigkeiten und Fehlern bei der Parametererhebung. Im Modularen Prozessmodell sind dies im Wesentlichen die Parameter zur Erhebung der internen und externen Schnittstellen der Module. Die Unsicherheiten sind auf die vereinfachte Darstellung im Modell sowie die bislang kaum erfassten bzw. nur schwer messbaren Daten zur Bestimmung der Interdependenzen zurückzuführen.⁵³³ Die bislang fehlende Datengrundlage erlaubt keine Bewertung der Unsicherheiten im vorliegenden Modell. Auf einen Ansatz muss an dieser Stelle verzichtet werden. Zukünftig ist eine Berücksichtigung der unsicheren Modellparameter anzustreben.

Unsicherheiten in der **Modellstruktur** sind auf die vereinfachte Darstellung von Strukturen und Prozessen zurückzuführen.⁵³⁴ Eine Erhebung strukturell bedingter Unsicherheiten kann durch Gegenüberstellung mit konkurrierenden Lebenszykluskostenmodellen erfolgen.⁵³⁵ Dies setzt eine grundsätzliche Übereinstimmung von Untersuchungsrahmen und Zielstellung der zu vergleichenden Modelle voraus. Bislang existieren hierzu, abgesehen vom Lebenszykluskostenmodell von VOGT⁵³⁶, keine adäquaten Modelle. Eine direkte Verifizierung der Unsicherheiten in der Modellstruktur ist dadurch nicht gegeben. Die unmittelbaren Zusammenhänge von Struktur und Attributen bzw. Prozessen (aus dem Modularen Prozessmodell) ermöglichen allerdings eine Berücksichtigung der Strukturunsicherheiten mit Hilfe der Unsicherheiten der Eingangsgrößen.

Weitere Unsicherheiten in der Modellstruktur ergeben sich aus möglichen zukünftigen Erweiterungen von Tunnelbauwerken, beispielsweise durch die Umsetzung neuer Regelwerke. Entsprechende Ereignisse können aufgrund ihrer Unvorhersehbarkeit nicht explizit berücksichtigt werden. Eine grobe Abschätzung könnte mit Hilfe historischer Entwicklungen erfolgen. Ein solcher Ansatz wäre allerdings ebenfalls mit großen Unsicherheiten verbunden, weshalb für die vorliegende Arbeit auf einen Ansatz verzichtet wird.

Unsicherheiten in den **Eingangsgrößen** resultieren aus einer unzureichenden Datengrundlage und der Prognose zukünftiger Ausprägungen.⁵³⁷ Sowohl historische Daten und deren Aufbereitung als auch die Prognose zukünftiger Werte führen zu entsprechenden Unsicherheiten. Das bedeutet, dass grundsätzlich alle im Modularen Prozessmodell bestimmten Attribute mit Unsicherheiten belegt sein können. Der Fokus richtet sich dabei auf

⁵³² vgl. GUPTA ET AL. (2005), S. 2021 ff.; siehe hierzu auch REFSGAARD ET AL. (2006), S. 1586

⁵³³ vgl. JULICH (2010), S. 10

⁵³⁴ vgl. GUPTA ET AL. (2005), S. 2024

⁵³⁵ vgl. KREIKENBAUM (2004), S. 589; JULICH (2010), S. 11

⁵³⁶ VOGT (2012)

⁵³⁷ vgl. GUPTA ET AL. (2005), S. 2025 f.

die Attribute Leistungen, Kosten und Zeitliche Parameter. Beim Attribut Schnittstelle handelt es sich um Unsicherheiten in den Modellparametern.⁵³⁸ Diese werden an dieser Stelle nicht einbezogen (siehe oben). Vielmehr sollen diese mit Hilfe der anderen Attribute Berücksichtigung finden.

Unsichere Eingangsgrößen im Modularen Prozessmodell:

Leistungen

Leistungen können sowohl hinsichtlich ihrer Ausprägung (z. B. Reinigung oder Wartung) als auch im Leistungsumfang (Menge bzw. Umfang) variieren und sind dadurch mit Unsicherheiten behaftet. Beide Faktoren werden allerdings durch die Kosten bzw. Zeitlichen Parameter abgebildet, so dass keine eigenständige Berücksichtigung der hieraus resultierenden Unsicherheiten in der Modellerweiterung vorzunehmen ist.

Kosten

Eine exakte (deterministische) Bestimmung der Kosten ist aufgrund der Prognose nicht möglich. Die Unsicherheiten können dabei vielfältig begründet sein. Beispielsweise verursachen zusätzliche Leistungen oder ein variierender Leistungsumfang Veränderungen in den Kostengrößen. Entsprechende Unsicherheiten gilt es durch Bestimmung einer Wahrscheinlichkeit hinsichtlich Ausprägung und Eintreten im Modularen Prozessmodell abzubilden.

Zeitliche Parameter

Zeitliche Parameter lassen sich, in Ermangelung genauer Vorgaben (z. B. rechtliche Vorschriften), durch unterschiedliche Einflüsse kaum exakt vorherbestimmen. Auch hier sind die Eingangsgrößen für das Modulare Prozessmodell (Nutzungsdauern, Häufigkeiten, Leistungswerte usw.) in Form probabilistischer Größen abzubilden.

Neben den Attributen unterliegen auch die Preisentwicklung und der Kalkulationszinssatz Schwankungen, die eine eindeutige Bestimmung deren zukünftiger Ausprägung nicht ermöglichen.⁵³⁹ Als wesentliche Eingangsgrößen für die Investitionsrechnung gilt es die hieraus resultierenden Unsicherheiten ebenfalls in die Risikoanalyse einzubinden.

Die Bestimmung der Ausprägungen probabilistischer Eingangsgrößen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen.⁵⁴⁰ Aus „*arbeitsökonomischen Gründen*“ ist es allerdings nicht zielführend, für jede Komponente eine eigenständige, wahrscheinlichkeitsbasierende Datenbasis aufzustellen.⁵⁴¹ Der mit der Erhebung dieser Daten verbundene Arbeitsaufwand macht es erforderlich, den Fokus auf Attribute zu richten, die das Ergebnis signifikant beeinflussen.⁵⁴²

⁵³⁸ vgl. KREIKENBAUM (2004), S. 588

⁵³⁹ vgl. GIRMSCHIED (2006), S. 398; VOGT (2012), S. 99 ff.

⁵⁴⁰ Die einzelnen Möglichkeiten wurden in Abs. 3.2.7 bzw. Anhang A.1 – Abs. A.1.5 erläutert.

⁵⁴¹ vgl. HARDKOP (2010), S. 64

⁵⁴² vgl. HARDKOP (2010), S. 64

8.3 Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten

Die Einbeziehung probabilistischer Eingangsgrößen erfordert neben der Erweiterung des Modells auch eine Erweiterung der Methodik zu Bestimmung der Lebenszykluskosten. Zur Berücksichtigung der mit Unsicherheiten behafteten Attribute wird in der erweiterten Methodik eine Risikoanalyse in Form einer Monte-Carlo-Simulation implementiert (Abbildung 8.1). Dies bietet den Vorteil, bisherige Rechengrößen und Ergebnisse problemlos zu integrieren und die Methodik dadurch anwendungsfreundlich auszugestalten.

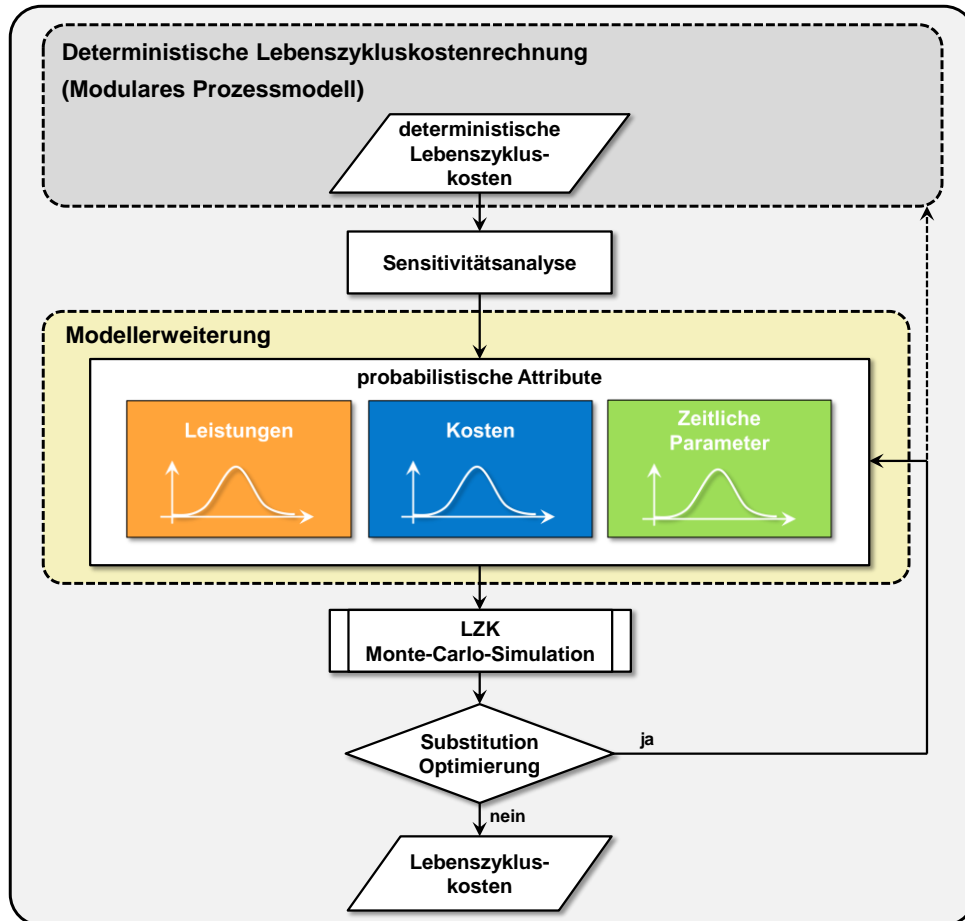


Abbildung 8.1: Methodik zur Bestimmung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung probabilistischer Eingangsgrößen⁵⁴³

8.3.1 Grundlagenbildung auf Basis deterministischer Attributsaupprägung

Ausgangsbasis zur Erweiterung der Methodik bildet die unter Abs. 7 vorgestellte deterministische Berechnung der Lebenszykluskosten. Dazu gehört ganz wesentlich, die Bestimmung des Untersuchungsrahmens unter Einbeziehung der Zielstellung (Abs. 7.1) sowie die Ausgestaltung des Modularen Prozessmodells auf Grundlage deterministischer Eingangsgrößen (Abs. 7.2).

Zur Eingrenzung des Aufwandes für die Erhebung der probabilistischen Daten ist vorab eine deterministische Lebenszykluskostenrechnung vorzunehmen (Abs. 7.3). Aus der ABC-Analyse ist bekannt, dass im Wesentlichen nur wenige Parameter für die Ergebnisausprägung verantwortlich sind.⁵⁴⁴ Vor diesem Hintergrund ist eine Einbeziehung aller

⁵⁴³ in Anlehnung an ENGELHARDT, SCHWARZ, THEWES (2014), S. 598

⁵⁴⁴ vgl. WÖHE (2000), S. 431

Eingangsgrößen in probabilistischer Ausprägung nicht zielführend. Zumal eine signifikante Steigerung der Zielgenauigkeit nicht erwartet werden kann, jedoch der mit der Erhebung der erforderlichen Daten verbundene Aufwand mitunter sehr hoch ist. Durch die Bestimmung der Lebenszykluskosten und mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen gilt es deshalb, die wesentlichen Risikofaktoren im Vorfeld zu identifizieren.⁵⁴⁵

Sofern bereits alle Eingangsgrößen bzw. die von den Entscheidungsträgern als relevant eingestuft Parameter in probabilistischer Form vorliegen, kann grundsätzlich auf eine vorherige deterministische Bestimmung der Lebenszykluskosten verzichtet werden.

8.3.2 Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der signifikanten Einflussparameter

Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen lassen sich die Risiken bzw. Parameter herausfiltern, die die Lebenszykluskosten wesentlich bestimmen. Methoden und Vorgehensweisen wurden bereits unter Abs. 7.4 vorgestellt.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen sind für das weitere Vorgehen, die mit probabilistischen Werten auszugestaltenden Parameter festzulegen.

8.3.3 Evaluation der Wahrscheinlichkeitsverteilung unsicherer Eingangsgrößen

Die Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation bedarf der Abbildung der unsicheren Eingangsgrößen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Hierzu werden die möglichen Ausprägungen der Parameter mit Hilfe von Verteilungsfunktionen beschrieben.⁵⁴⁶

Zur Bestimmung der für die Risikoanalyse notwendigen Wahrscheinlichkeitsfunktionen wird auf die in Abs. 3.2.7 bzw. Anhang A.1 – Abs. A.1.5 vorgestellten Verfahren verwiesen. Dabei können, abhängig von der vorliegenden Datengrundlage, mit Hilfe von Zeitreihen, historischen Daten oder (subjektiven) Abschätzungen, die Ausprägung sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Eingangsgrößen bestimmt werden.

Um Verfälschungen in der Zielgrößenausprägung zu vermeiden, gilt es für die weitere Risikoanalyse, neben den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Größen, die Abhängigkeiten zwischen den Eingangsgrößen abzubilden.⁵⁴⁷ Auch hier können, ausgehend von einer ausreichenden Datengrundlage, durch Korrelationsanalysen die statistischen Zusammenhänge evaluiert werden (Abs. 3.2.4). In Ermangelung aussagekräftiger Daten ist auch eine (subjektive) Abschätzung der Korrelationen möglich.⁵⁴⁸

8.3.4 Monte-Carlo-Simulation zur Berechnung der Lebenszykluskosten auf Basis probabilistischer Eingangsgrößen

Die Bestimmung der Lebenszykluskosten auf Basis unsicherer Eingangsgrößen ist aufgrund der Komplexität nur mit Hilfe numerischer Simulationsverfahren möglich. Hierzu wird auf die Monte-Carlo-Simulation (MCS) als bekanntes Verfahren der Risikoanalyse zurückgegriffen. Vorteil ist, dass das bisherige deterministische Modell zur Berechnung der Lebenszykluskosten ohne Anpassungen übernommen werden kann und lediglich um die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der unsicheren Größen erweitert werden muss.

Für die programmtechnische Umsetzung in der Lebenszykluskostenrechnung wird auf anwenderfreundliche Add-Ins für die weit verbreitete Tabellenkalkulationssoftware Micro-

⁵⁴⁵ Eine beispielhafte Umsetzung erfolgt in Abs. 10.3.1.

⁵⁴⁶ vgl. FABRYCKY, BLANCHARD (1991), S. 186

⁵⁴⁷ vgl. GÖTZE (2008), S. 377; SCHINDEL (1977), S. 30 ff.

⁵⁴⁸ vgl. KAMARIANAKIS (2013), S. 142

soft-EXCEL[®] zurückgegriffen. Diese erlauben eine weitere Verwendung der bisher entwickelten Tabellen und Berechnungsroutinen. Eigenständige Komplettlösungen sind für die vorgesehene modulare Zusammensetzung des Untersuchungsrahmens zu statisch und bedürfen zudem einer umfangreichen Einarbeitung.

Die grundlegende Vorgehensweise einer MCS besteht in der Generierung von Szenarien mit Hilfe von eigenständig ermittelten Zufallsgrößen.⁵⁴⁹ Durch wiederholende Berechnungsläufe stellt sich dabei eine stabile Häufigkeitsverteilung ein, die wahrheits-basierende Aussagen über die Zielgröße (z. B. Kapitalwert) ermöglicht (Abbildung 8.2).⁵⁵⁰

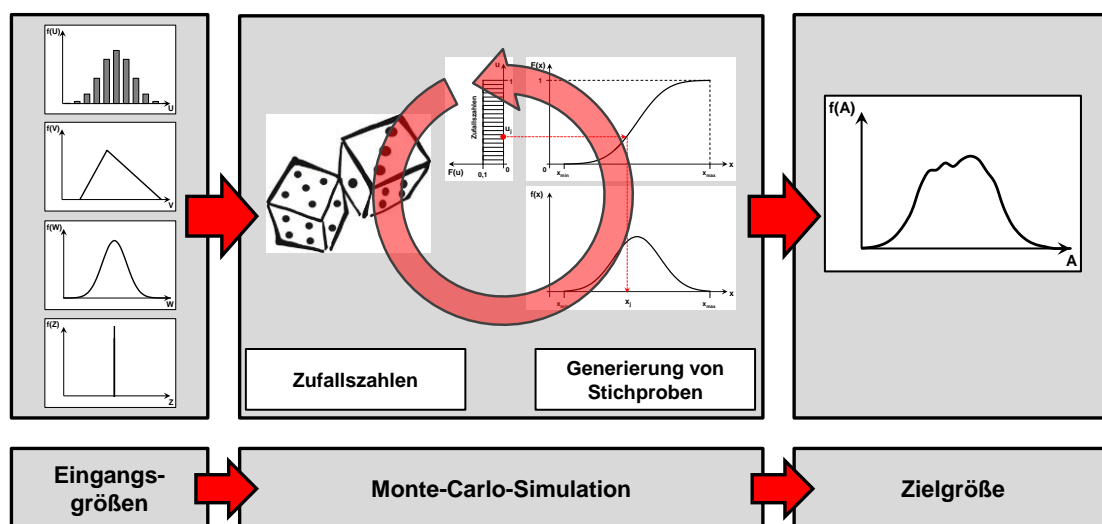


Abbildung 8.2: Vorgehensweise bei einer Monte-Carlo-Simulation zur Lebenszykluskostenrechnung

8.3.5 Identifikation von Substitutionspotentialen und ökonomische Optimierung

Die grundsätzliche Zielstellung der Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken ist auch unter Einbeziehung probabilistischer Eingangsgrößen umsetzbar. Wie unter deterministischen Voraussetzungen gilt es hierzu Optimierungspotentiale zu generieren und umzusetzen. Dazu sei an dieser Stelle auf die unter Abs. 7.5 vorgestellten Vorgehensweisen verwiesen.

8.3.6 Bewertung und Feststellung der Lebenszykluskosten

Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation umfasst nur eine Bandbreite aller möglichen Ergebnisausprägungen entsprechend der Anzahl der Simulationsdurchläufe. GLEISSNER verwendet hierfür den Begriff „repräsentative Stichprobe“.⁵⁵¹ Hieraus lassen sich Rückschlüsse über die eigentliche Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lebenszykluskosten und die sich daraus ergebenden Risikomaßzahlen ableiten. Anders als bei der deterministischen Ermittlung erfordert das nicht eindeutige, wahrheits-basierende Ergebnis der Gesamtkosten eine eigenständige Analyse und Bewertung. Ausgehend von der gewonnenen Verteilungsfunktion und den sich daraus ergebenden Kenngrößen zur Interpretation der Risikomaße, hat ein Abgleich der untersuchten Varianten zu erfolgen.⁵⁵²

⁵⁴⁹ vgl. THEIS, KERNBICHLER (2002), S. 9; SCHWARZ, SANDOVAL-WONG, SÁNCHEZ (2011), S. 362

⁵⁵⁰ vgl. BLOHM, LÜDERS (1991), S. 252

⁵⁵¹ GLEISSNER (2004), S. 355

⁵⁵² Eine beispielhafte Umsetzung erfolgt in Abs. 10.4.6.

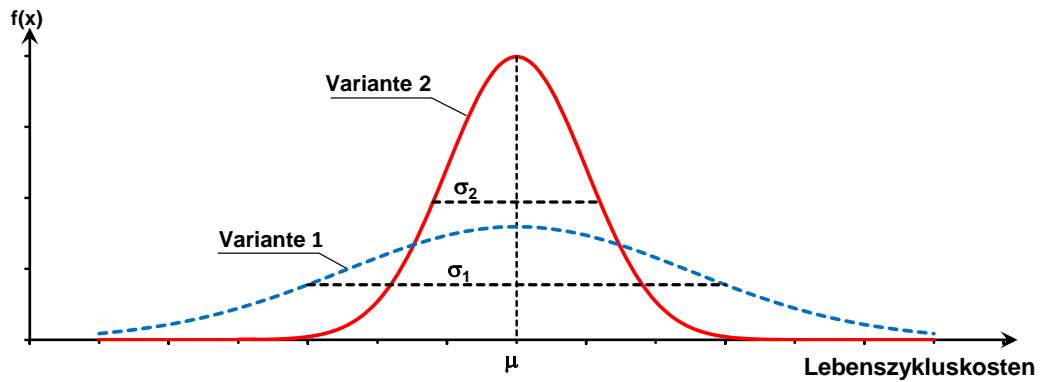


Abbildung 8.3: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von zwei Varianten zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit

Für die Auffindung der aus ökonomischer Sicht vorteilhaftesten Ausgestaltung ist zusätzlich die Risikobereitschaft (avers, neutral, affin) der Entscheidungsträger einzubeziehen. In Abbildung 8.3 sind die Ergebnisverteilungen zweier Varianten dargestellt. Beide verfügen über einen identischen Erwartungswert (μ), jedoch ist die Standardabweichung (σ) von Variante 1 größer, als die der Alternative. Eine risikoaffine Entscheidung würde Variante 1 den Vorzug geben, da gegenüber Variante 2 die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass die Lebenszykluskosten geringer ausfallen als der vermeintliche Erwartungswert.

9 Kontinuierliche Optimierung der Lebenszykluskosten

Das bisherige Vorgehen zur Optimierung der Kosten von Tunnelbauwerken konzentriert sich im Wesentlichen auf die Planungsphase im Zuge eines Neubaus bzw. einer grundlegenden Sanierung von Bestandsbauwerken.⁵⁵³ Anstelle dieser Singularität ist es zielführender, diese Option zur Kostenreduzierung dauerhaft in allen Lebensphasen, in Form einer kontinuierlichen Optimierung, zu implementieren. Das in anderen Bereichen bereits weitverbreitete Konzept des Benchmarking erlaubt diese fortwährende Generierung von Optimierungs- und Verbesserungspotentialen. Die PIARC empfiehlt aus diesem Grund die Umsetzung des Best-Practise-Ansatzes zur Optimierung des Tunnelbetriebes unter technischen und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten.⁵⁵⁴

Vorteil des Benchmarking ist neben dem Gewinn von Kennzahlen auch die Auseinandersetzung mit den für die Kennzahlen verantwortlichen Leistungen und Prozessen. Dadurch bildet sich ein Bewusstsein für die interne Struktur und die realen Arbeitsabläufe. Weiteres Nebenprodukt des Benchmarking: Durch die fortwährende Datenerhebung erhält das Tunnelmanagement einen Überblick über die laufenden Kosten sowie den Gesamtzustand des Bauwerkes. Hieraus ist die Relevanz der einzelnen Kostengrößen ableitbar. Dies erleichtert die Strategieausrichtung für das Instandhaltungsmanagement (bzw. Bauwerksmanagement) und unterstützt die Entscheidungsfindung für zukünftige Investitionen. Das Modulare Prozessmodell, mit der darin implementierten konsistenten Kostenstruktur und der Möglichkeit zur Untersuchung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit mit Hilfe der Lebenszykluskostenrechnung, bildet die Grundlage für die Umsetzung einer kontinuierlichen Optimierung durch Anwendung des Benchmarking-Konzeptes.⁵⁵⁵

In den nachfolgenden Abschnitten wird eine eigenständige Vorgehensweise zur Umsetzung der Benchmarking-Methode vorgestellt. Ziel ist eine kontinuierliche Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken.

9.1 Benchmarking-Konzept für Tunnelbauwerke

Zur Umsetzung des Benchmarking-Konzeptes ist das in Abs. 4 erläuterte Fünf-Phasen Modell aufzugreifen und auf die Besonderheiten von Tunnelbauwerken anzupassen.

Die Phase der Zieldefinition wird umgewidmet und beschränkt sich auf die Bestimmung und Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes. Die Zielstellung ist mit der Reduzierung der Lebenszykluskosten bereits vorgegeben. Verstärktes Augenmerk ist auf die Phase der internen Analyse zu richten. Wie Experteninterviews mit Bauherrn, Planern und Tunnelbetreibern gezeigt haben, findet bislang keine konsistente Erhebung und Aufbereitung aussagekräftiger Daten statt. Dieser Mangel soll durch eine vertiefte Auseinandersetzung mit den eigenen Zahlen und Prozessen behoben werden und allen Beteiligten Transparenz und Übersicht verschaffen. Eine korrekte Erhebung und Fortschreibung der Daten ist wesentlicher Grundstock sowohl für die Kostenplanung als auch für die Optimierung von Tunnelbauwerken. Hierfür erfolgt eine Erweiterung des Fünf-Phasen-Modells, durch Einführung der Phasen: Datenerfassung, Datenaufbereitung und Kennzahlenbildung (Abbildung 9.1).

⁵⁵³ vgl. VOGT (2012) oder HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983)

⁵⁵⁴ vgl. PIARC (1999), S. 151; PIARC (2005), S. 135 ff.

Eine eigenständige Vorgehensweise zur Umsetzung von Benchmarking wurde dabei nicht vorgestellt.

⁵⁵⁵ Die Grundlagen zum Benchmarking wurden in Abs. 4 erläutert.

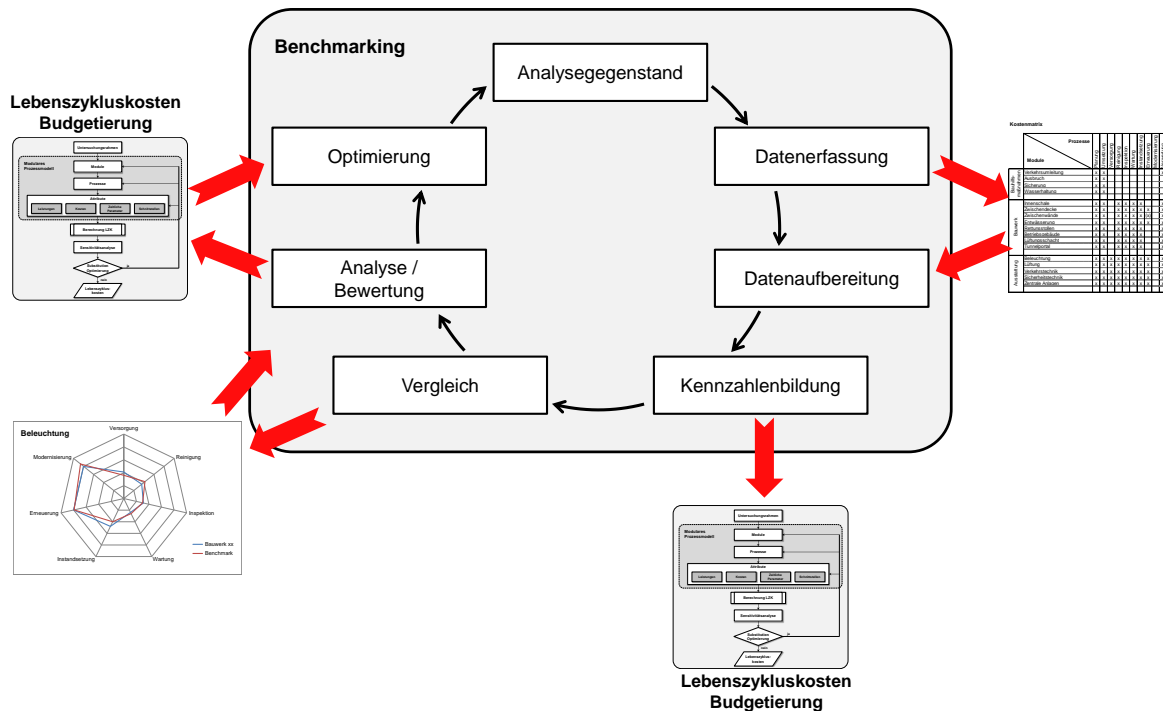


Abbildung 9.1: Benchmarking-Konzept für Tunnelbauwerke

9.1.1 Bestimmung des Analysegegenstands

Die vorgegebene Zielausrichtung zur Optimierung der Lebenszykluskosten beschränkt die Zieldefinition auf die Festlegung des Analysegegenstandes. Es gilt die zu betrachtenden Prozesse bzw. Bauteile zu identifizieren. Dabei können auf Basis des Modularen Prozessmodells grundsätzlich alle Module und Prozesse für eine Gegenüberstellung herangezogen werden. Abhängig vom Detaillierungsgrad können Module auch zu übergeordneten Modellebenen (Baugruppe oder System) aggregiert und für einen Vergleich aufbereitet werden.⁵⁵⁶ Dazu ist festzulegen, wie die erforderlichen Daten erhoben werden. Zur Begrenzung des Aufwandes bietet sich eine Konzentration auf die wesentlichen Kostentreiber eines Tunnelbauwerkes an.⁵⁵⁷ Diese können mit Hilfe der vorgestellten Methodik zur Berechnung der Lebenszykluskosten und der darin implementierten Sensitivitätsanalyse identifiziert und bestimmt werden.⁵⁵⁸ Entscheidungskriterium für die Bestimmung des Analysegegenstandes ist das Verhältnis von Aufwand (der Datenerhebung) zu voraussichtlichem Nutzen (Optimierungspotential) der einzelnen Elemente.⁵⁵⁹ Alternativ kann für eine strategische Optimierung der Untersuchungsgegenstand durch Entscheidungsträger bzw. Experten auf ausgewählte Elemente beschränkt werden.⁵⁶⁰

Die Form des Benchmarking (extern oder intern) ist abhängig vom Vergleichsgegenstand zu wählen. Extern bedeutet dabei einen Vergleich mit Tunnelbauwerken die von anderen, unabhängigen Einheiten betrieben werden bzw. ein Vergleichen mit gleichgelagerten Prozessen anderer Branchen. Internes Benchmarking gründet auf eine Gegenüberstellung mit eigenen Objekten bzw. Prozessen.⁵⁶¹

⁵⁵⁶ vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 93

⁵⁵⁷ WILDEMANN verwendet hierfür den Begriff der „Schlüsselprozesse.“ [vgl. WILDEMANN (2013), Präambel II]

⁵⁵⁸ vgl. Abs. 7 – Methodik zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten

⁵⁵⁹ vgl. REISBECK, SCHÖNE (2009), S. 110

⁵⁶⁰ In Abs. 10.4 erfolgt eine erste beispielhafte Anwendung an einem eingeschränkten Untersuchungsrahmen.

⁵⁶¹ siehe Abs. 4 – Grundlagen Benchmarking

9.1.2 Datenerfassung

Die kontinuierliche Erfassung der Daten ist der wesentliche Prozess für eine erfolgreiche Umsetzung des Benchmarking-Konzeptes. Die englische Phrase „garbage in, garbage out“ fasst die grundsätzliche Problematik der Datengenerierung zusammen. Wo unvollständige, unstrukturierte Daten Eingang finden, kann kein vernünftiges Ergebnis erwartet werden. Deshalb ist für diesen Prozess ein entsprechender Aufwand einzukalkulieren. So sind beispielsweise neben dem Energieverbrauch für die Tunnelbeleuchtung auch die spezifischen Kosten (€/kWh) zu erheben, so dass ein Vergleich mit anderen Bauwerken transparent dargestellt werden kann.

Die Datenerhebung für die Vergleichsgrößen kann auf primären und sekundären sowie internen und externen Quellen beruhen.⁵⁶² Primär bedeutet in diesem Zusammenhang, dass Daten direkt aus den zu vergleichenden Projekten heraus erhoben werden, während bei sekundären Quellen auf vorhandene Daten (z. B. Literaturwerte) zurückgegriffen wird. Interne und externe Daten differieren hinsichtlich ihrer Herkunft (interner Betrieb bzw. externer, unabhängiger Betreiber). Die erforderlichen Größen gilt es in quantitativer Form zu erheben (bei primärer Erhebung durch Messung bzw. Zählung). Ausgangsbasis für die Datenerhebung stellt die im Modularen Prozessmodell implementierte Kostenstruktur dar.⁵⁶³ Diese ist auf den vorher definierten Analysegegenstand auszurichten. Qualitative Größen erschweren dabei die angestrebte Vergleichbarkeit und sind deshalb, beispielsweise mit dem Verfahren nach LISSON⁵⁶⁴, vorab in quantitative Größen zu überführen.

Neben den eigentlichen Vergleichsgrößen, sind auch die wesentlichen Leistungen und Prozesse sowie vorliegende Randbedingungen und Einflussfaktoren zu erfassen. Beispielsweise Art, Umfang und Häufigkeit der Reinigung der Tunnelwände oder die zulässige Verkehrsgeschwindigkeit als wesentliche Einflussgrößen für den Energieverbrauch der Beleuchtung. Dabei kann auf die im Modularen Prozessmodell bestimmten Attribute und Interdependenzen aus der Schnittstellenmatrix zurückgegriffen werden.⁵⁶⁵ Es gilt, den jeweiligen Prozess und seine Größen vollumfänglich zu erfassen und zu verstehen.

9.1.3 Datenaufbereitung

Grundvoraussetzung für die Durchführung von Benchmarking ist die Vergleichbarkeit der Daten und Kennzahlen. Vorhandene Störfaktoren, beispielsweise unterschiedliche Vergleichszeitpunkte, Preisschwankungen u. ä., sind zur Herstellung der formellen Voraussetzungen zu beseitigen.⁵⁶⁶ So kann die Datenerhebung, insbesondere bei azyklischen Prozessen (z. B. Instandsetzung), für ein einheitliches Betrachtungsjahr mitunter nicht vollständig erfolgen. Stattdessen ist auf Daten mit abweichendem Bezugsjahr zurückzugreifen. Dies macht eine zeitliche Gewichtung der monetären Größen mit Hilfe von Preisindizes erforderlich. Gleiches gilt für die einzelnen Bestandteile der Kostengröße, sofern für die Datenerhebung auf Zeitreihen zurückgegriffen wird. Mehrwert- bzw. Umsatzsteuer sind im Sinne einer einheitlichen Datenstruktur nicht aufzunehmen. Die bei der Datenerhebung vorliegende Marktsituation ist zu erfassen und zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit durch Aufbereitung auf einen „vollkommen Markt“ zu transferieren.⁵⁶⁷

⁵⁶² vgl. STAUDT ET AL. (1985), S. 70

⁵⁶³ vgl. Abs. 6.4

⁵⁶⁴ vgl. LISSON (2014)

⁵⁶⁵ vgl. Abs. 6.5

⁵⁶⁶ vgl. ZDROWOMYSLAW, KASCH (2002), S. 124

⁵⁶⁷ vgl. MÜHLENKAMP (1994), S. 133

Um Verfälschungen auszuschließen sind die erhobenen Daten zusätzlich auf Plausibilität zu prüfen. Es ist zu kontrollieren, ob es zu Fehlern in der Datenerhebung bzw. der Übertragung gekommen ist. Entsprechende Unstimmigkeiten sind zu beheben oder führen anderweitig zum Ausschluss als Vergleichsgröße.⁵⁶⁸

Wesentlich für ein erfolgreiches Benchmarking ist ein Verständnis für die zu untersuchenden Größen zu entwickeln. Dabei ist nicht nur auf die reine Zahl als Kenngröße abzustellen. Vielmehr ist ein Gespür für den jeweiligen Prozess, vollumfänglich mit Leistungen, Kosten, Schnittstellen usw., vergleichbar mit dem Modularen Prozessmodell, aufzubauen.

9.1.4 Kennzahlenbildung

Grundlage für einen Vergleich und damit für die kontinuierliche Optimierung sind aussagekräftige Kennzahlen. Diese haben die Aufgabe, vorliegende komplexe Sachverhalte zusammenzufassen und so zu verdichten, dass hieraus Informationen über den Untersuchungsgegenstand (Bauwerk, Modul usw.) bzw. dessen Prozesse ersichtlich werden.⁵⁶⁹ Die Kennzahlen leiten sich aus den bisher gesammelten Daten ab und dienen sowohl als Vergleichsgröße, als Zielgröße oder als Kontrollgröße.⁵⁷⁰ Grundsätzlich sind zwei Arten von Kennzahlen zu differenzieren:⁵⁷¹

Absolute Kennzahlen

Absolute Zahlen umfassen Einzelzahlen, Summen, Differenzen oder Mittelwerte und stehen dadurch nicht in Bezug zu einer anderen Größe (z. B. die jährlichen Kosten für die Reinigung der Tunnelwände in Euro €). Die Tatsache, dass es sich bei Tunnelbauwerken in nahezu allen Fällen um Unikate handelt, erlaubt eine Anwendung von absoluten Zahlen als Vergleichskriterium nur in Ausnahmefällen.

Relative Kennzahlen

Relative Kennzahlen werden aus dem Verhältnis von absoluten Größen und wesentlichen Bezugsgrößen gebildet. Wichtigste Größe ist die Beziehungszahl, bei der Kostengrößen und wesentliche Einflussgrößen in Relation gesetzt werden.⁵⁷² Beispielsweise als Quotient aus den Kosten für die Tunnelreinigung und der zu reinigenden Fläche in €/m². Durch diese Verknüpfung auf Basis sachlogischer Zusammenhänge erlauben relative Kennzahlen eine Gegenüberstellung von vergleichbaren, aber nicht zwangsläufig identischen Bauwerken, Modulen oder Prozessen.

Die modulare Struktur ermöglicht eine Zusammenfassung von absoluten Kennzahlen zur Bildung von übergeordneten relativen Kennzahlen. Beispielsweise eine Aggregation der Kosten aller Prozesse für ein Modul, einer Bauteilgruppe usw. Alternativ wäre auch eine prozessweise Auswertung (z. B. Reinigung) über eine Bauteilgruppe, ein System oder das gesamte Bauwerk möglich. Die jeweiligen Bezugsgrößen sind entsprechend zu definieren.⁵⁷³

⁵⁶⁸ Die Vorgehensweise zur Datenaufbereitung wird in Abs. 10.4.3 an einem Beispiel aufgezeigt.

⁵⁶⁹ vgl. ZDROWOMYSLAW, KASCH (2002), S. 69; REISBECK, SCHÖNE (2009), S. 69

⁵⁷⁰ vgl. SIEGWART (1998), S. 16 f.; SCHRÖDER (2003), S. 145

⁵⁷¹ vgl. MEYER (1976), S. 12; STAUDT ET AL. (1985), S. 25 ff.

⁵⁷² vgl. ZDROWOMYSLAW, KASCH (2002), S. 73 f.

⁵⁷³ In Abs. 10.4.4 wird die Bildung von Kennzahlen an einem Projektbeispiel vorgenommen.

Über die Anwendung als Vergleichsgrößen sind die entwickelten Kennzahlen auch als Grundlage zur Kostenplanung für die frühen Planungsphasen anwendbar. Die Ableitung der Kenngrößen aus der Kostenstruktur des Modulare Prozessmodells erlaubt zudem eine Verwendung als Eingangsgrößen für die Lebenszykluskostenrechnung oder Budgetierung von Tunnelbauwerken.

Eine beispielhafte Bestimmung von Bezugsgrößen und Kennzahlen zur Umsetzung des Benchmarking-Konzeptes erfolgt in Abs. 9.2.

9.1.5 Vergleich von Kennzahlen

Aus den reinen Kennzahlen ist grundsätzlich kein Erkenntnisgewinn über eine ökonomische Vorteilhaftigkeit zu erzielen. Erst eine Gegenüberstellung mit anderen Kennzahlen (Benchmarks) erlaubt diesbezügliche Rückschlüsse. Die Vergleichbarkeit der Kennzahlen ist deshalb ein wesentliches Kriterium zur Durchführung von Benchmarking. Insbesondere die bau-, verkehrs- bzw. sicherheitstechnischen Standards der einzelnen Untersuchungsgegenstände müssen vergleichbar sein. Andernfalls ist eine direkte Gegenüberstellung durch Anpassung mit Hilfe weiterführender Faktoren herzustellen.

Für den Vergleich werden die erhobenen Ist-Kennzahlen des Untersuchungsgegenstandes den Soll-Kennzahlen (Benchmarks) gegenübergestellt. Ziel ist die ganzheitliche Optimierung von Tunnelbauwerken, weshalb nicht zwangsläufig die jeweils „besten Kennzahlen“ dem Untersuchungsgegenstand gegenübergestellt werden müssen. Es gilt immer das Gesamtbauwerk und die vorhandenen Interdependenzen in Betracht zu ziehen.

Zur Veranschaulichung der Leistungslücken ist zusätzlich zur rechnerischen Gegenüberstellung (Differenzbildung) eine Visualisierung der Ergebnisse vorzunehmen. Neben der Auswertung durch Balkendiagramme bieten sich insbesondere Netzdiagramme zur graphischen Darstellung der Leistungslücken an (Abbildung 9.2).⁵⁷⁴

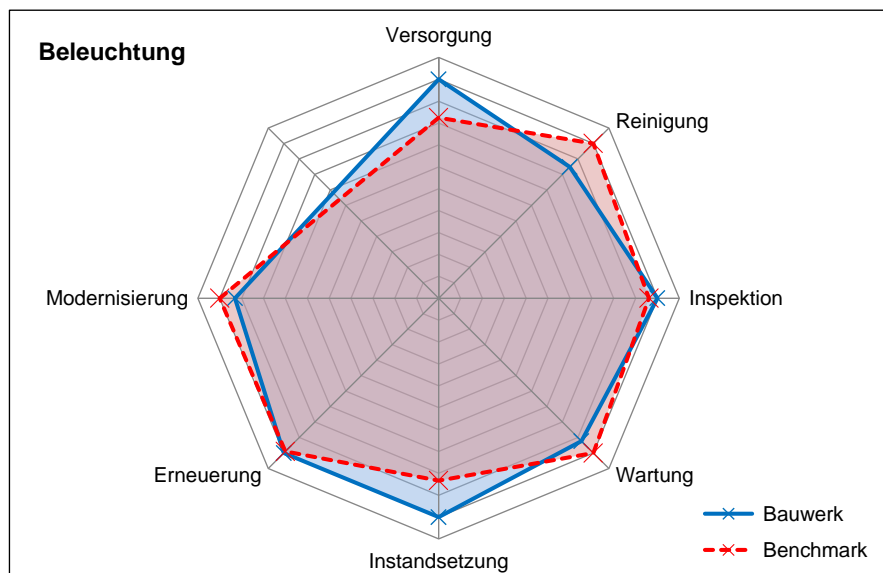


Abbildung 9.2: Netzdiagramm für Kennzahlenvergleich

⁵⁷⁴ Am Beispiel zur Verifizierung von Modell und Methodik wird in Abs. 10.4.5 die Identifizierung von Leistungslücken exemplarisch aufgezeigt.

9.1.6 Ergebnisanalyse und Erfassung von Optimierungspotentialen

Nach der Gegenüberstellung der Kennzahlen hat die Analyse der vorliegenden Leistungsdifferenzen zu erfolgen. Auf Basis einer objektiven Bewertung und unter Zuhilfenahme der Einflussfaktoren ist zu bestimmen, welche Gründe für die Leistungslücken verantwortlich sind.⁵⁷⁵ Dazu sind die einzelnen Prozesse, deren Leistungsinhalt sowie die zugehörigen Arbeitsabläufe zu durchleuchten und dem Benchmark-Prozess gegenüberzustellen. Ziel ist es, hieraus Ansätze zur Optimierung der eigenen Prozesse und Leistungen abzuleiten (Abbildung 9.3).

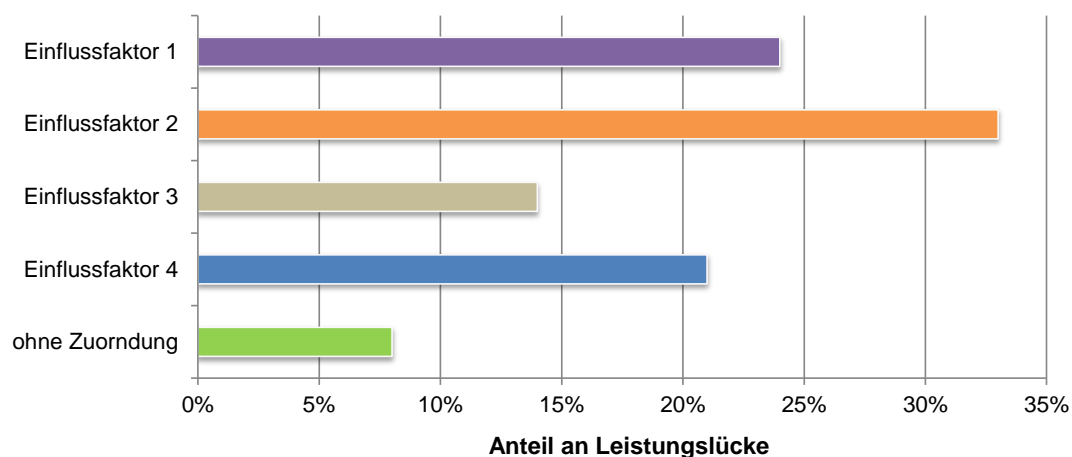


Abbildung 9.3: Visualisierung der Anteile der Einflussfaktoren an der Leistungslücke

Es ist zu prüfen, ob eine weitere Optimierung zielführend sein kann und welche Schritte dazu vorzunehmen sind. Die notwendigen Ansätze gilt es herauszuarbeiten, wobei vorhandene Interdependenzen einzubeziehen sind. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen anschließend als Eingangsgrößen zur Neuberechnung der Lebenszykluskosten. Zunächst sind die Einsparungsmöglichkeiten, mit Hilfe des Modularen Prozessmodells und der zugehörigen Methodik, theoretisch zu bestimmen und zu verifizieren. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die zur Umsetzung der Optimierungen notwendigen Investitionskosten zu legen. Grundsätzlich ist das Ziel einer realistischen, ganzheitlichen Kostenoptimierung zu verfolgen. Das bedeutet, dass nicht zwangsläufig jeder Benchmark maßgeblich sein muss. Vielmehr können vorhandene Abhängigkeiten dazu führen, dass durch Umsetzung eines Benchmarks, andere ungünstig beeinflusst werden. Zur Berücksichtigung entsprechender Interdependenzen ist, sofern erforderlich, das Gesamtpaket der untersuchten Kennzahlen in die Betrachtungen einzubeziehen.

Abschließend ist eine Entscheidung darüber zu treffen, ob und wenn ja, welche Optimierungsansätze weiter verfolgt und umgesetzt werden sollen. Dazu sind Handlungsanweisungen und Vorgehensweisen zu erarbeiten, die die Umsetzung der einzelnen Maßnahmen vorgeben.⁵⁷⁶

9.1.7 Optimierung

Die abschließende Aufgabe umfasst die Umsetzung der bislang theoretischen Optimierungsansätze. Identifizierte Leistungslücken sind zu schließen wobei eine Verbesserung der vorgegebenen Benchmarks anzustreben ist. Die mit der Analyse zu erstellende, theo-

⁵⁷⁵ vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 170; WILDEMANN (2013), S. 168

⁵⁷⁶ vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 188

retische Handlungsanweisung ist in den Planungsprozess und in die spätere Ausführung zu überführen. Die Maßnahmen reichen von der gezielten Optimierung einzelner Arbeitsschritte in der Betriebsphase bis hin zur Modernisierung vollständiger Modul-Einheiten bzw. Bauteilgruppen. Häufig ist auch die Frage zu klären, ob bestimmte Aufgaben künftig in Eigenleistung oder durch Outsourcing von externen Dienstleistungsunternehmen zu erbringen sind.⁵⁷⁷

Das Benchmarking endet nicht mit Abschluss des Optimierungsprozesses. Vielmehr handelt es sich um eine kontinuierliche Managementleistung. Mit deren Hilfe ist der Erfolg der umgesetzten Maßnahmen zu kontrollieren und zu dokumentieren. Zusätzlich sind weitere Optimierungspotentiale durch wiederholte Anwendung zu generieren. Durch die dauerhafte Implementierung soll das Ziel einer kontinuierlichen Optimierung der Kosten und Prozesse für den Bau und Betrieb von Tunnelbauwerken Umsetzung finden.

9.2 Bestimmung von Kennzahlen zur kontinuierlichen Optimierung

Für eine konsistente Datenerhebung und der Möglichkeit einer standardisierten Verwendung sind aussagekräftige Kennzahlen abzuleiten. Zur Bildung entsprechender Größen ist eine Bestimmung der wesentlichen Bezugsgrößen erforderlich. Diese sind auf die jeweils maßgebende Einflussgröße zu beziehen (z. B. Tunnelreinigung bezogen auf die zu reinigende Tunnelfläche in m²). Die dadurch erzielte Vergleichbarkeit erhöht die Aussagekraft der Benchmarking-Ergebnisse sowie den Erkenntnisgewinn zur Umsetzung von Optimierungen.⁵⁷⁸

Zur Veranschaulichung der Vorgehensweise für die Kennzahlbildung werden nachfolgend für beispielhafte Kostengrößen, die jeweilige Bezugsgröße und daraus abgeleitet, die Einheit der Kennzahl hergeleitet (Tabelle 9.1).

Tunnelreinigung (Gewölbe bzw. Wände)

Die Reinigung der Tunnelwände wird entscheidend durch die zu reinigende Fläche bestimmt. Dabei können die Kosten – bezogen auf die Fläche – über das gesamte Bauwerk als konstant angesehen werden. Als Bezugsgröße eignet sich somit die zu reinigende Fläche mit Höhe der Reinigungsfläche und der Tunnellänge. Ist die Höhe bekannt und bei Untersuchungsbauwerk und Vergleichsbauwerk identisch, kann auf die Tunnellänge als Bezugsgröße abgestellt werden. Dies bietet sich insbesondere auch deshalb an, da die Tunnellänge als markante Größe eines Tunnelbauwerkes wahrgenommen wird.

Inspektion (Gewölbe bzw. Wände)

Der Aufwand für die Bauwerksprüfung des Gewölbes bzw. der Tunnelwände- und decken wird maßgeblich durch den Bauwerkszustand und die zu inspizierende Bauteilfläche bestimmt. Der Bauwerkszustand kann aufgrund von unterschiedlichen Randbedingungen für das jeweilige Bauwerk, aber auch innerhalb eines Tunnels sehr großen Schwankungen unterliegen. Die zu prüfende Fläche eines Bauwerkes kann dagegen als unveränderliche Größe angesehen werden, so dass diese als Bezugsgröße heranzuziehen ist.

⁵⁷⁷ vgl. KARLÖF, ÖSTBLOM (1993), S. 178 ff.

⁵⁷⁸ vgl. WILDEMANN (2013), S. 99

Versorgung Einfahrtsbeleuchtung

Die für die Einfahrtsbeleuchtung maßgeblichen Parameter umfassen die Leuchtdichte in der Annäherungsstrecke sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit bei der Tunnelfahrt. Zusammen mit der Leuchtdichte der Innenstrecke prägen diese Größen die Länge der Einfahrtsstrecke. Der nicht konstante Verlauf der die Kosten bestimmenden Leuchtdichte führt dazu, dass die Kosten der Einfahrtsbeleuchtung zu keiner Einflussgröße in Relation gesetzt werden können. Die Kennzahl zur Abbildung der Kosten ist in diesem Fall als absolute Größe zu formulieren.

Versorgung Innenbeleuchtung

Die Kosten für die Energieversorgung werden wesentlich durch die erforderliche Leuchtdichte und die Tunnellänge geprägt. Anders als bei der Leuchtdichte der Einfahrtsbeleuchtung ist deren Verlauf über die gesamte Tunnellänge konstant. Ausnahme stellen dabei sehr lange Tunnelbauwerke dar, bei denen eine Abminderung der Leuchtdichte über die Tunnellänge vorgenommen werden kann.⁵⁷⁹ Zusätzlich sind für Sonderbereiche (z. B. Pannenbuchten) erhöhte Leuchtdichtewerte aufzubringen. Diese sind allerdings in gesonderten Modulen zu erfassen. Als Bezugsgröße kann für die Versorgung der Innenbeleuchtung (bei Bauwerken ≤ 2.500 m) auf die Tunnellänge zurückgegriffen werden.

Reinigung Einfahrts- und Innenbeleuchtung

Die Anzahl der Leuchten bestimmt den Aufwand und damit die Kosten für die Reinigung der Einfahrts- bzw. Innenbeleuchtung. Die Leuchten der Innenstrecke sind in der Regel in einem gleichmäßigen Abstand an der Tunneldecke bzw. an der Wand befestigt. Hieraus würde sich auch ein Zusammenhang zwischen der Tunnellänge und den Reinigungskosten ableiten lassen. Allerdings wird der Abstand der Leuchten von vielen Einflussfaktoren, wie beispielsweise Leuchtenleistung, erforderliche Leuchtdichte, Längsgleichmäßigkeit bestimmt. Eine Korrelation zwischen Tunnellänge und Leuchtdichte kann somit nicht allgemeingültig hergestellt werden. Entsprechendes gilt auch für die Einfahrtsbeleuchtung, die durch den veränderlichen Leuchtdichteverlauf über un stetigen Leuchtenabstand verfügen kann. Für die Kennzahlbildung ist letztlich auf die Kosten je Tunnelleuchte, als relative Kennzahl abzustellen.

Tabelle 9.1: Kennzahlen und Bezugsgrößen für Tunnelbauwerke

Modul	Prozess	Bezugsgröße	Einheit Bezugsgröße	Einheit Kennzahl
Gewölbe bzw. Wände	Reinigung	zu reinigende Fläche	m ²	€/m ²
		Tunnellänge (alternativ)	m	€/m
Gewölbe bzw. Wände	Inspektion	zu prüfende Fläche	m ²	€/m ²
Einfahrtsbeleuchtung	Versorgung	-	-	€
Einfahrtsbeleuchtung	Reinigung	Leuchtenanzahl	Stck.	€/Stck.
Einfahrtsbeleuchtung	Wartung	Leuchtenanzahl	Stck.	€/Stck.
Innenbeleuchtung	Versorgung	Tunnellänge	m	€/m
Innenbeleuchtung	Reinigung	Leuchtenanzahl	Stck.	€/Stck.
Innenbeleuchtung	Wartung	Leuchtenanzahl	Stck.	€/Stck.

⁵⁷⁹ vgl. FGSV (2006), S. 18 oder auch FSV (2014)A, S. 18 – Abminderung ab einer Tunnellänge > 2.500 m

10 Applikation zur Verifizierung von Modell und Methodik

In den vorangegangenen Ausführungen wurden das Modulare Prozessmodell zur ganzheitlichen, strukturierten Erfassung der Gesamtkosten eines Tunnelbauwerkes (Abs. 6) sowie die zugehörigen Methoden zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten (Abs. 7 bis Abs. 9) vorgestellt. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Funktionalität und Anwendbarkeit dieser neuen Ansätze an einem realitätsnahen Beispiel verifiziert.

Die vorgenommene Strukturierung erlaubt es, zur Darstellung der Funktionalität und Anwendbarkeit, den Untersuchungsumfang auf einzelne Module einzugrenzen. Aus diesem Grund erfolgt an dieser Stelle eine Verifizierung an einem abgegrenzten Untersuchungsumfang. Eine Erweiterung und Projektspezifizierung ist durch die Modularität grundsätzlich möglich und wird im Rahmen der Verifizierung auch vorgenommen. Um zusätzlich die Flexibilität und Offenheit der entwickelten Systematik aufzuzeigen, basiert die Ausgestaltung des Bauwerkes und dessen Betrieb auf österreichischen Normen und Richtlinien.

Für die Berechnung der notwendigen Eingangsgrößen bzw. Attribute wird, soweit möglich, auf vorliegende Daten zurückgegriffen (Ausschreibungsunterlagen, Literaturwerte, Expertenaussagen usw.). Bei fehlenden Ansätzen werden Abschätzungen vorgenommen bzw. Größen aus artverwandten Fachgebieten (Brückenbau, Bauwerksinstandsetzung usw.) abgeleitet. Ziel ist es, die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik und dem ihr zugrundeliegenden Modularen Prozessmodell nachzuweisen und deren Funktionalität aufzuzeigen. Für die Bewertung der Ergebnisse gilt es zu beachten, dass durch eine Erweiterung des Untersuchungsrahmens Änderungen in den Ergebnissen zu erwarten sind (z. B. Verschiebung der Relevanz einzelner Module bzw. von Erst- und Folgekosten), die allerdings an dieser Stelle keine Berücksichtigung finden sollen.

10.1 Projektbeschreibung

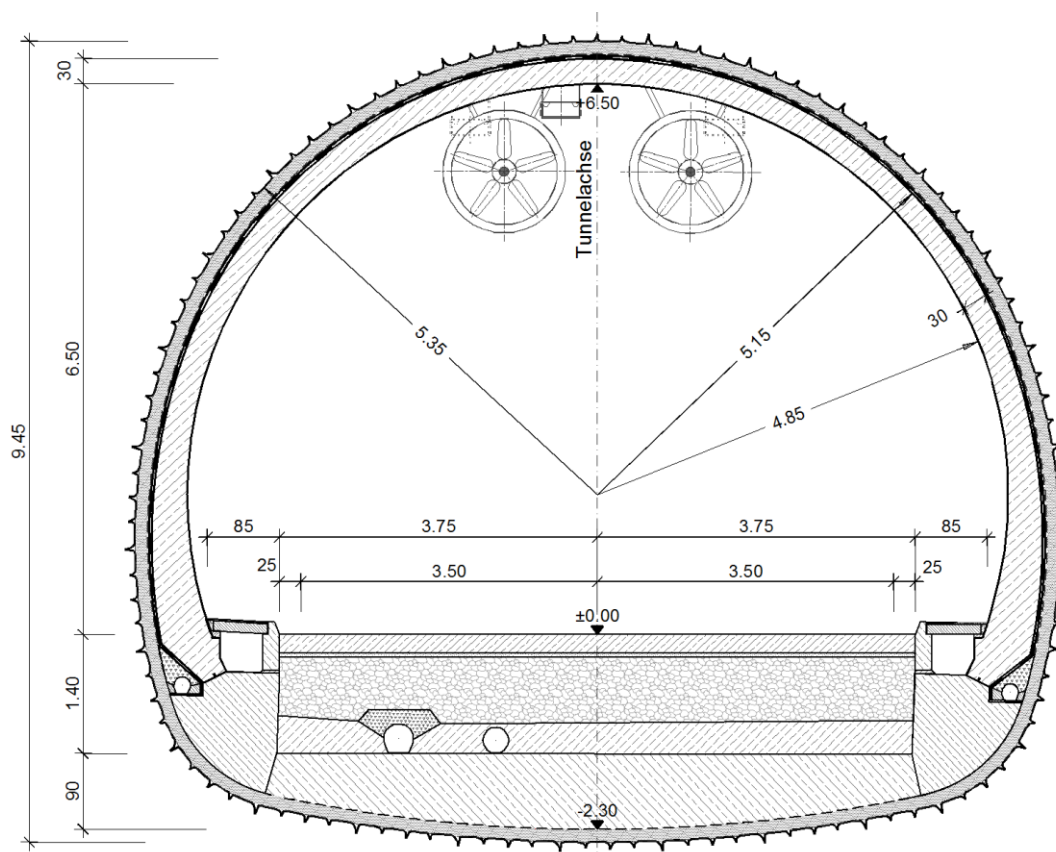
Die Applikation von Modell und Methodik erfolgt an einem zweiröhrigen Straßentunnel einer Bundesstraße (Mustertunnel). Das Tunnelbauwerk wird im Richtungsverkehr mit zwei getrennten Röhren und zwei Spuren für jede Fahrtrichtung betrieben. Der Regelquerschnitt verfügt über ein Lichtraumprofil mit einer Breite von 9,20 m und einer Höhe von 6,50 m (Abbildung 10.1). Das Bauwerk dient zur Querung eines Gebirgskammes und folgt dabei einer West-Ost Ausrichtung. Süd- und Nordröhre besitzen jeweils eine Länge von 2.400 m mit einer gleichmäßigen Steigung von 2 % in Ost-West-Richtung. Die Anordnung von Seitenstreifen ist nicht vorgesehen. Die erforderlichen Nothalte- bzw. Pannenbuchten sind in einem Abstand von 500 m bzw. 700 m angeordnet. Die Flucht- und Rettungswege (Querschläge) sind in einem maximalen Abstand von 500 m situiert. Jede zweite Tunnelquerverbindung ist dabei als befahrbarer Querschlag ausgebildet. Die Herstellung des Bauwerkes erfolgte in geschlossener Bauweise als Gewölbequerschnitt mit flacher Sohle. Für die beiden Röhren wurde ein zweischaliger Ausbau mit Regenschirmabdichtung und Ulmendrainage zur Bergwasserableitung vorgesehen (Abbildung 10.1; Abbildung 10.2).

Die Innenbeleuchtung ist einreihig, versetzt zur Tunnelachse, über der linken Fahrspur, die Einfahrtsbeleuchtung ist zweireihig, über dem jeweiligen Fahrstreifen angeordnet. Als Tunnellüftung wurde eine mechanische Längslüftung mittels Strahlenventilatoren vorgesehen. Diese sind über dem Verkehrsraum an der Innenschale befestigt (Abbildung 10.1). Planung, Bau und Betrieb des Tunnelbauwerkes basieren auf österreichischen Normen und Richtlinien.

Die Verkehrsfreigabe der beiden Tunnelröhren erfolgte im November 2014.

Tabelle 10.1: Zusammenstellung Parameter Mustertunnel

Parameter	Mustertunnel	
Anordnung	km 0 + 000 bis km 2 + 400	
Verkehrsfreigabe	01.11.2014	
Betriebsart	Richtungsverkehr	
Anzahl der Tunnelröhren	2	
Fahrspuren je Fahrtrichtung	2	
Tunnellänge	Nordröhre	Südröhre
	2.400 m	2.400 m
Längsneigung	+ 2 %	- 2 %
Tunnelquerschnitt	Gewölbequerschnitt	
Querschnittsbreite / -höhe	6,50 m / 9,20 m	
Querschnittsfläche	52,50 m ²	
Bauweise	bergmännisch / geschlossen	
Ausbau	zweischalig	
Abdichtung	Regenschirm mit Ulmendrainage	
Tunnellüftung	mechanisch, Strahlenventilatoren	
Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke	14.000 Kfz/24h (Jahr 2014)	
Bemessungsrelevante Verkehrsdichte	1.000 Kfz/h	
zul. Höchstgeschwindigkeit	100 km/h	

**Abbildung 10.1: Regelquerschnitt Mustertunnel**

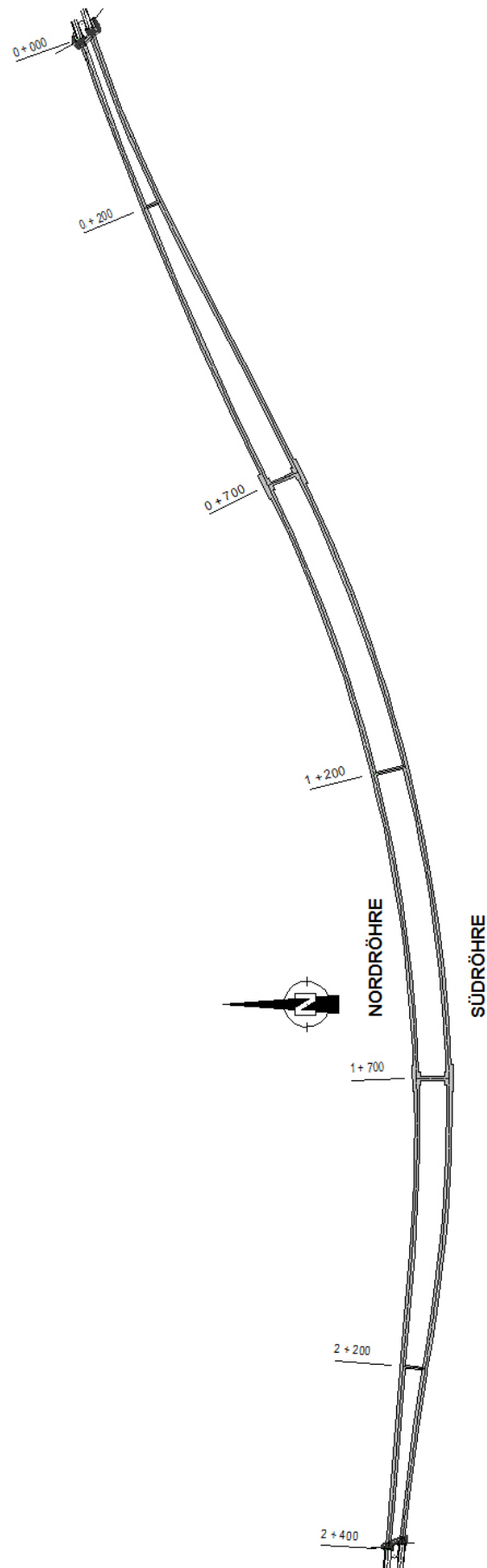


Abbildung 10.2: Übersichtslageplan Mustertunnel

10.2 Deterministische Projektuntersuchung

10.2.1 Untersuchungsrahmen

Die Verifizierung von Modell und Methodik erfolgt auf Basis eines abgegrenzten Untersuchungsrahmens. Dazu werden die Module „Gewölbe“, „Sohle“, „Einfahrtsbeleuchtung“, „Innenbeleuchtung“ und „Lüftungsanlage“ eingehender untersucht. Weitere Ausstattungselemente, wie z. B. Beschilderung, Videoüberwachung, USV-Anlage usw. bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt. Ebenfalls werden für die nachfolgenden Untersuchungen die Bauhilfsmaßnahmen, auch aufgrund des fehlenden Einflusses auf die Folgekosten, ausgeklammert.

Als Untersuchungsgegenstand dient das unter Abs. 10.1 dargestellte, neu errichtete Tunnelbauwerk.

Da das Bauwerk bereits im November 2014 für den Verkehr freigegeben wurde, ist an dieser Stelle rückblickend die Zielstellung zu verfolgen, die Lebenszykluskosten für den Untersuchungsumfang zu erfassen. Dabei ist anzustreben, die Kosten des Bauwerkes auf Basis der zu untersuchenden Module zu optimieren. Als Zeitrahmen für die Betrachtungen wird ein Zeitraum von 100 Jahren als übliche Lebensdauer von Tunnelbauwerken angesetzt. Die Ausgestaltung des Untersuchungsrahmens ist in Tabelle 10.2 zusammengefasst.

Tabelle 10.2: Untersuchungsrahmen Mustertunnel

Untersuchungsrahmen			
Gegenstand	Ausprägung	Zielstellung	Zeitrahmen
• Neubau	<ul style="list-style-type: none"> • Innenschale <ul style="list-style-type: none"> ○ Gewölbe ○ Sohle • Beleuchtung <ul style="list-style-type: none"> ○ Einfahrtsbeleuchtung ○ Innenbeleuchtung • Lüftung <ul style="list-style-type: none"> ○ Lüftungsanlage 	• Optimierung der Lebenszykluskosten	• 100 Jahre

Durch die Beschränkung auf einige wesentliche Ausstattungselemente sowie dem Verzicht auf die Einbeziehung von Bauhilfsmaßnahmen ist zu berücksichtigen, dass im Ergebnis nicht die tatsächliche Verteilung der Erst- und Folgekosten bzw. die Relevanz der einzelnen Kostenbestandteile in Bezug auf das Gesamtbauwerk wiedergegeben werden.

10.2.2 Ausgestaltung des Untersuchungsgegenstandes

Entsprechend dem in Abs. 6.2 vorgestellten Grundaufbau eines Moduls sind nachfolgend die zu untersuchenden Module – unter Berücksichtigung des vorliegenden Informationsstands – vollumfänglich auszugestalten. Die Erhebung der einzelnen Attribute für alle Module wurde separat in Anhang A.2 vorgenommen. Die für die weitere Bearbeitung wesentlichen Größen der einzelnen Module sind in den Modulblättern zusammengestellt (Tabelle 10.4 bis Tabelle 10.8). Zusätzlich werden zur besseren Übersicht, die Schnittstellen aller Module in einer eigenen Schnittstellenmatrix erfasst (Tabelle 10.9).

Kostenstruktur

Abgeleitet aus den Attributen der einzelnen Module, sind für die in Abs. 6.4 vorgestellte Kostenstruktur, die einzelnen Kostengrößen des jeweiligen Betrachtungsjahres zu bestimmen. Bei den Größen handelt es sich um eine Aufsummierung der einzelnen Kostenbestandteile für den entsprechenden Prozesse und das jeweilige Jahr (endfälligen Berechnung zum 31.12.). Die Kosten werden in nominaler Ausprägung in die Kostenmatrix aufgenommen.

Beispielhaft sind die für das 31. Betriebsjahr (2044) anfallenden Kosten in Tabelle 10.3 zusammengestellt. In diesem Jahr werden die Kosten für die 1. Instandsetzung des Tunnelgewölbes (nach 30 Jahren Nutzungsdauer) wirksam.

Tabelle 10.3: Kostenstruktur für das 31. Betriebsjahr – 2044 (1. Instandsetzung Gewölbe)

Bauwerk System Baugruppe Modul	Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung
Mustertunnel 2044	0 €	0 €	57.300 €	7.900 €	8.900 €	3.700 €	2.979.789 €	187.800 €
Baukonstruktion	0 €	0 €	0 €	5.900 €	0 €	0 €	2.945.700 €	0 €
Innenschale	0 €	0 €	0 €	5.900 €	0 €	0 €	2.945.700 €	0 €
Gewölbe	0 €	0 €	0 €	5.900 €	0 €	0 €	2.945.700 €	0 €
Sohle	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Ausstattung	0 €	0 €	57.300 €	2.000 €	8.900 €	3.700 €	34.089 €	187.800 €
Beleuchtung	0 €	0 €	56.400 €	900 €	3.500 €	2.200 €	5.569 €	77.300 €
Einfahrtsbeleuchtung	0 €	0 €	27.600 €	500 €	1.500 €	1.100 €	3.091 €	32.700 €
Innenbeleuchtung	0 €	0 €	28.800 €	400 €	2.000 €	1.100 €	2.478 €	44.600 €
Lüftung	0 €	0 €	900 €	1.100 €	5.400 €	1.500 €	28.520 €	110.500 €
Lüftungsanlage	0 €	0 €	900 €	1.100 €	5.400 €	1.500 €	28.520 €	110.500 €

Durch Aggregation aller Kostenstrukturen über den gesamten Betrachtungszeitraum wird das Modulare Prozessmodell vollumfänglich abgebildet (Abbildung 10.3) und dient als Ausgangsbasis für die nachfolgenden Arbeitsschritte (z. B. Berechnung der Lebenszykluskosten).

Bauwerk System Baugruppe Modul	Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung
Mustertunnel 2020	0 €	0 €	57.300 €	15.400 €	49.000 €	24.500 €	6.732 €	0 €
Mustertunnel 2019	0 €	0 €	57.300 €	7.900 €	9.500 €	8.200 €	11.829 €	0 €
Mustertunnel 2018	0 €	0 €	57.300 €	7.900 €	45.000 €	23.500 €	6.729 €	0 €
Mustertunnel 2017	0 €	0 €	57.300 €	15.400 €	13.500 €	20.000 €	6.729 €	0 €
Mustertunnel 2016	0 €	0 €	57.300 €	7.900 €	45.000 €	3.700 €	0 €	0 €
Mustertunnel 2015	0 €	0 €	57.300 €	7.900 €	9.500 €	3.700 €	0 €	0 €
Mustertunnel 2014	4.032.500 €	22.874.700 €	9.550 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Baukonstruktion	3.434.000 €	21.483.700 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Innenschale	3.434.000 €	21.483.700 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Gewölbe	1.692.000 €	10.446.200 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Sohle	1.742.000 €	11.037.500 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Ausstattung	598.500 €	1.391.000 €	9.550 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Beleuchtung	348.000 €	749.300 €	9.400 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Einfahrtsbeleuchtung	162.000 €	320.100 €	4.600 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Innenbeleuchtung	186.000 €	429.200 €	4.800 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Lüftung	250.500 €	641.700 €	150 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Lüftungsanlage	250.500 €	641.700 €	150 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €

Abbildung 10.3: Ausbildung des Modularen Prozessmodells (auszugsweise)

10.2.2.1 Modul Gewölbe

Die Erhebung der einzelnen Attribute erfolgt in Anhang A.2 – Abs. A.2.1.1. In Tabelle 10.4 sind die wesentlichen Größen für das Modulare Prozessmodell zusammengefasst.

Tabelle 10.4: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Gewölbe“

Parameter	Elemente	Anzahl
Tunnellänge	Stahlbeton C 25/30	34.080 m ³
Querschnittsgröße, QS-Umfang, Geometrie	Bewehrung BSt 500 S/M	
Einwirkungen (Erddruck, Wasserdruck usw.)	Fugenbänder (Block-, Arbeitsfugen usw.)	
	Einbauteile (Ankerschienen, Leerrohre usw.)	

Prozesse	Leistungen	Kosten	Zeitliche Parameter	Schnittstellen
Planung	Erstellung Planungsunterlagen, Objekt- und Tragwerksplanung, Prüfung, Bauüberwachung, Verwaltung, Projektmanagement	1.692.000 €	-	-> siehe Umsetzung
Umsetzung	Vermessung, Koordination, Bewehrung, Schalung, Einbauteile, Betonage, Nachbehandlung, Verpressung	10.446.200 €	-	Einwirkungen, QS-Form, -Größe, Tunnellänge, <-> Abdichtung <-> Sohle
Versorgung				
Reinigung	Reinigung (bis 3 m Wandhöhe) Reinigung (Gewölbe komplett)	5.900 € 13.400 €	1x jährlich alle 3 Jahre (im Wechsel)	Umgebungsbeding., Steigung, Fläche, Oberflächengüte <-> Beschichtung <-> Beleuchtung
Inspektion	Laufende Überwachung Kontrolle Prüfung	200 € 35.500 € 115.800 €	3x jährlich alle 2 Jahre alle 12 Jahre	Querschnittsgröße, Tunnellänge, Bauwerkszustand
Wartung	Ausbessern von Fehlstellen, Rissverfüllung usw.	* 4.500 €	1x jährlich	-> siehe Instandsetzung
Instandsetzung	großflächige Instandsetzung (1) großflächige Instandsetzung (2)	2.945.700 € 6.139.800 €	nach 30 Jahren nach 60 Jahren	Betongüte, -deckung, Fläche, Lebensdauer Umgebungsbeding., Instandhaltungsstrateg., <-> Beschichtung
Erneuerung				
Modernisierung				

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme des Leistungsaufwandes bis zur Instandsetzung.

10.2.2.2 Modul Sohle

Die Bestimmung der erforderlichen Attribute ist Anhang A.2 – Abs. A.2.1.2 zu entnehmen. Tabelle 10.5 enthält eine Zusammenstellung der wesentlichen Größen.

Tabelle 10.5: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Sohle“

Parameter		Elemente		Anzahl
Tunnellänge		Stahlbeton C 25/30 Sohlbalken		12.000 m ³
Querschnittsgröße, QS-Umfang, Geometrie		Stahlbeton C 25/30 Sohle		27.360 m ³
Einwirkungen (Erddruck, Wasserdruck usw.)		Bewehrung BSt 500 S/M		
		Fugenbänder (Block-, Arbeitsfugen usw.)		
		Einbauteile (Erdungsband, Leerrohre usw.)		

Prozesse	Leistungen	Kosten	Zeitliche Parameter	Schnittstellen
Planung	Erstellung Planungsunterlagen, Objekt- und Tragwerksplanung, Prüfung, Bauüberwachung, Verwaltung, Projektmanagement	1.742.000 €	-	-> siehe Umsetzung
Umsetzung	Vermessung, Koordination, Bewehrung, Schalung, Einbauteile, Betonage, Nachbehandlung, Verpressung	11.037.500 €	-	Einwirkungen, QS-Form, -Größe, Tunnellänge, <-> Abdichtung <-> Gewölbe
Versorgung				
Reinigung				
Inspektion				
Wartung				
Instandsetzung				
Erneuerung				
Modernisierung				

10.2.2.3 Modul Einfahrtsbeleuchtung

Die für das Modul erforderlichen Attribute sind Anhang A.2 – Abs. A.2.2.1 zu entnehmen. In Tabelle 10.6 erfolgt eine Zusammenstellung der dabei erhobenen Größen.

Tabelle 10.6: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“

Parameter	Elemente	Anzahl
Natriumdampf-Hochdrucklampen (GSB)	Natriumdampf-Hochdrucklampe 150 W	124 Stck.
zweireihige Leuchtenanordnung (Tunnelfirste)	Natriumdampf-Hochdrucklampe 250 W	48 Stck.
Stufenschaltung	Natriumdampf-Hochdrucklampe 400 W	160 Stck.
max. Leuchtdichte L_{fe} 178,5 cd/m ²	Verkabelung	18.000 m
Richtungsverkehr	Kabelrinne	1.000 m
Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h	Sensor Außenleuchtdichte L_{20}	2 Stck.
Gefährdungsklasse II	Leuchtdichtemessgerät (Innenbereich)	4 Stck.
Reflexionseigenschaften Fahrbahn / Gewölbe		

Prozesse	Leistungen	Kosten	Zeitliche Parameter	Schnittstellen
Planung	Dimensionierung, Planung, Verwaltung, Prüfung, Bauüberwachung	162.000 €		-> siehe Umsetzung
Umsetzung	Lieferung, Montage, Einbau, Einstellung, Messung, Kalibrierung	320.100 €	-	Art / Anzahl Leuchten, Länge Einsichtstrecke, Außenleuchtdichte, Höchstgeschwindigkeit Oberflächenreflexion, <-> Portalgestaltung, Gewölbe, Fahrbahn
Versorgung	Energieversorgung	27.600 €	1x jährlich	-> siehe Umsetzung, jährl. Betriebsdauer, Energiepreis, <-> USV-Anlage
Reinigung	Reinigung	500 €	1x jährlich	Anzahl Leuchten, Instandhaltungsstrategie
Inspektion	Kontrolle	1.500 €	1x jährlich	Instandhaltungsstrategie
	Prüfung	1.700 €	1x jährlich	
Wartung	Kalibrierung Leuchtdichte	1.100 €	1x jährlich	Lebensdauer, Leuchtmittel, Anzahl, jährl. Betriebsdauer Instandhaltungsstra.
	Austausch Leuchtmittel	19.800 €	alle 4 Jahre	
Instandsetzung	allgemeine Reparaturarbeiten	* 1.200 €	1x jährlich	Qualität der Leuchten
	Leuchten und Leuchtmittel	* 1.900 €	1x jährlich	Anzahl Leuchten, Instandhaltungsstrategie
Erneuerung	Erneuerung Sensorik	32.700 €	alle 15 Jahre	jähr. Betriebsdauer, Lebensdauer, Anzahl, gepl. Nutzungsdauer, -> siehe Umsetzung
	Erneuerung Leuchten	416.000 €	alle 20 Jahre	
Modernisierung				

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme des Leistungsaufwandes bis zur Erneuerung.

10.2.2.4 Modul Innenbeleuchtung

Die Bestimmung der erforderlichen Attribute erfolgt in Anhang A.2 – Abs. A.2.2.2. Die wesentlichen Größen sind in Tabelle 10.7 zusammengefasst.

Tabelle 10.7: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Innenbeleuchtung“

Parameter	Elemente	Anzahl
Natriumdampf-Hochdrucklampen (SB)	Natriumdampf-Hochdrucklampe 150 W	276 Stck.
einreihige Leuchtenanordnung (Tunnelfirste)	Verkabelung	30.000 m
Tunnellänge: 2.400 m	Kabelrinne	3.200 m
Leuchtdichte $L_{fi} = 3,3 \text{ cd/m}^2$	Leuchtdichtemessgerät	10 Stck.
Richtungsverkehr		
Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h		
Gefährdungsklasse II		
Reflexionseigenschaften Fahrbahn / Gewölbe		

Prozesse	Leistungen	Kosten	Zeitliche Parameter	Schnittstellen
Planung	Dimensionierung, Planung,	186.000 €	-	-> siehe Umsetzung
	Verwaltung, Prüfung, Bauüberwachung			
Umsetzung	Lieferung, Montage, Einbau,	429.200 €	-	Art / Anzahl Leuchten, Tunnellänge, Leuchtdichte, Höchstgeschwindigkeit Oberflächenreflexion, <-> Gewölbe, Fahr- bahn, Beschichtung
	Einstellung, Messung, Kalibrierung			
Versorgung	Energieversorgung	28.800 €	1x jährlich	-> siehe Umsetzung, jährl. Betriebsdauer, Energiepreis, <-> USV-Anlage
Reinigung	Reinigung	400 €	1x jährlich	Anzahl Leuchten, Instandhaltungs- strategie
Inspektion	Kontrolle	2.000 €	1x jährlich	Instandhaltungs- strategie
	Prüfung	2.300 €	1x jährlich	
Wartung	Kalibrierung Leuchtdichte	1.100 €	1x jährlich	Lebensdauer, Leuchtmittel, Anzahl, jährl. Betriebsdauer, Instandhaltungsstra.
	Austausch Leuchtmittel	16.300 €	alle 3 Jahre	
	Austausch Leuchtmittel und VVG	22.600 €	alle 9 Jahre	
Instandsetzung	allgemeine Reparaturarbeiten	* 1.300 €	1x jährlich	Qualität der Leuchten, Anzahl Leuchten, Instandhaltungs- strategie
	Leuchten und Leuchtmittel	* 1.200 €	1x jährlich	
Erneuerung	Erneuerung Sensorik	44.600 €	alle 15 Jahre	jährl. Betriebsdauer, Lebensdauer, Anzahl, gepl. Nutzungsdauer, -> siehe Umsetzung
	Erneuerung Leuchten	526.400 €	alle 20 Jahre	
Modernisierung				

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme des Leistungsaufwandes bis zur Erneuerung.

10.2.2.5 Modul Lüftungsanlage

Die erforderlichen Attribute sind gesondert in Anhang A.2 – Abs. A.2.3.1 bestimmt worden. Tabelle 10.8 umfasst eine Zusammenstellung der wesentlichen Größen.

Tabelle 10.8: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Lüftungsanlage“

Parameter	Elemente	Anzahl
Längslüftung – Strahlventilatoren	Strahlventilatoren ø 1.000 mm	22 Stck.
Tunnellänge: 2.400 m	Volumenstrom 20,9 m³/s	
Querschnittsfläche: 52.50 m²	Stand Schub 770 N	
Tunnelumfang: 27,80 m	Leistungsaufnahme 16,4 kW	
Längsneigung: +2 % bzw. -2 %	Verkabelung	13.000 m
Verkehrsart: Richtungsverkehr	Sensorik CO + Sichttrübe	8 Stck.
Gefährdungsklasse II	Sensorik Luftgeschwindigkeit	6 Stck.
zul. Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h		

Prozesse	Leistungen	Kosten	Zeitliche Parameter	Schnittstellen
Planung	Dimensionierung,	250.500 €	-	-> siehe Umsetzung
	Erstellung Planungsunterlagen, Verwaltung, Prüfung, Bauüberwachung			
Umsetzung	Lieferung, Montage, Einbau, Einstellung, Messung	641.700 €	-	Tunnelgeometrie, Steigung, Brandlast, Anzahl / Art Lüfter
Versorgung	Energieversorgung (Testbetrieb und Fehlalarm)	900 €	1x jährlich	-> siehe Umsetzung jährl. Betriebsdauer, Energiekosten, <-> USV-Anlage
Reinigung	Reinigung Lüfter & Sensorik	1.100 €	1x jährlich	Anzahl Lüfter, Umgebungsbeding.
Inspektion	Kontrolle	2.200 €	1x jährlich	Anzahl Lüfter,
	Prüfung	3.200 €	1x jährlich	Instandhaltungs- strategie
Wartung	Austausch von Verschleißteilen, Schmier- und Betriebsstoffe	1.500 €	1x jährlich	Instandhaltungs- strategie, jährl. Betriebsdauer
Instandsetzung	allgemeine Reparaturarbeiten	*1.200 €	1x jährlich	jährl. Betriebsdauer,
	Austausch und Reparatur Lüfter	5.100 €	alle 5 Jahre	Anzahl Lüfter,
	Austausch Sensorik	13.800 €	nach 8 Jahren	Instandhaltungs- strategie
	Austausch Einzellüfter	22.200 €	nach 10 Jahren	
Erneuerung	Erneuerung Sensorik	110.500 €	alle 15 Jahre	jährl. Betriebsdauer,
	Erneuerung Lüftungsanlage	619.200 €	alle 20 Jahre	Lebensdauer, Anzahl gepl. Nutzungsdauer, -> siehe Umsetzung
Modernisierung				

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme des Leistungsaufwandes bis zur Erneuerung

10.2.3 Berechnung der Lebenszykluskosten

Ausgehend von den in Abs. 10.2.2 erhobenen Attributen der einzelnen Module werden nachfolgend die Lebenszykluskosten für den Untersuchungsrahmen berechnet. Es wird hierfür, wie in Abs. 3.1.4 herausgearbeitet, auf die finanzmathematischen Ansätze der Investitionsrechnung zurückgegriffen. Dazu findet an dieser Stelle das dynamische Rechenverfahren der Kapitalwertmethode – mit der in Abs. 7.3 definierten Formel 7.1 – Anwendung.⁵⁸⁰

Für den Kapitalzinssatz wird auf den Realzinssatz abgestellt. Dadurch können Preissteigerungen methodisch ausgeklammert werden, sofern diese dem üblichen Verbraucherpreisindex entsprechen.⁵⁸¹ Zur Bewertung, ob weitere Preissteigerungen berücksichtigt werden müssen, wurde die für ein Tunnelbauwerk relevanten Preisindizes und deren zeitliche Veränderungen untersucht und in Abbildung 10.4 zusammengestellt.⁵⁸² Aus den Verläufen der einzelnen Indizes ist zu erkennen, dass einzige der Baupreisindex und der Verbraucherpreisindex auf einem vergleichbaren Niveau verlaufen. Die Preise für Elektrische Ausrüstungen bzw. auch der Strompreis unterliegen derzeit einer deutlich geringeren Steigerungsrate. Für die nachfolgende Berechnung wird deshalb auf einen Ansatz einer weiteren Preissteigerung verzichtet. Zur späteren Untersuchung der Sensitivität für die unterschiedlichen Leistungen werden im Berechnungsgang die entsprechenden Größen jedoch bereits vorgesehen.

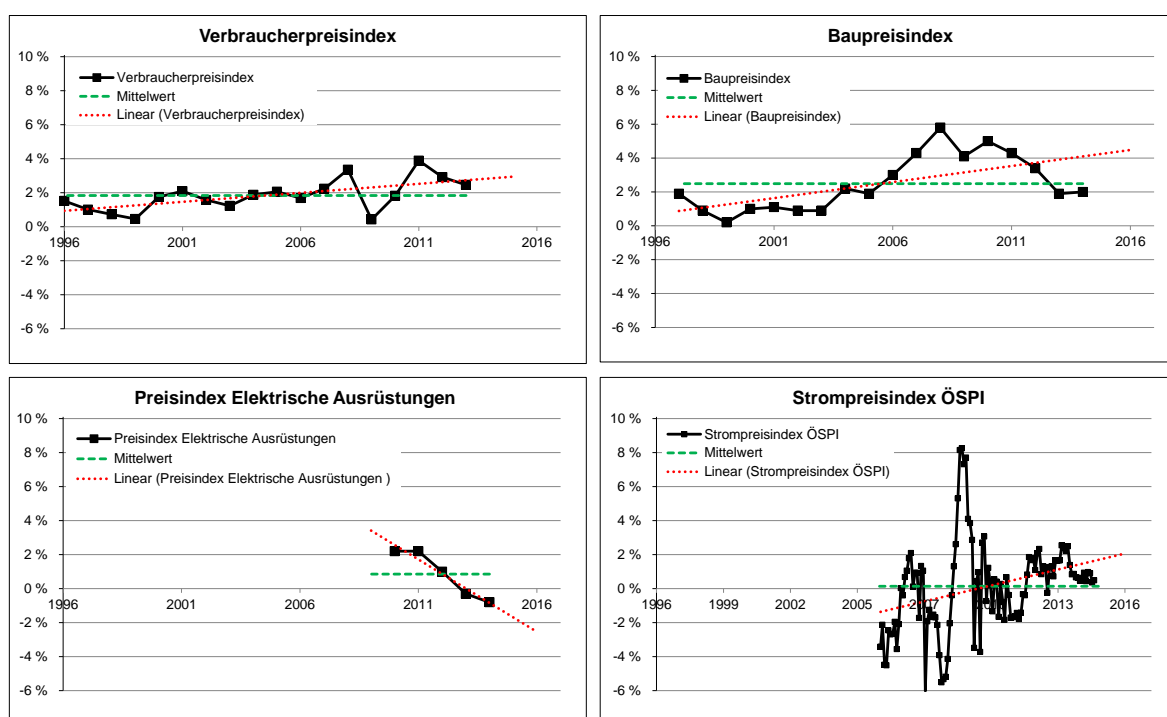


Abbildung 10.4: Zeitliche Veränderung der relevanten Preisindizes inkl. eines Mittelwertes und einer linearen Trendlinie

⁵⁸⁰ Die notwendigen Grundlagen sind Abs. 3.1.5 bzw. 3.1.6 zu entnehmen.

⁵⁸¹ Durch die Abstimmung auf einen Nominalzins müsste im ersten Schritt die Kostensteigerung bezogen auf das Bezugsjahr berechnet und im Gegenzug die Abzinsung mit dem Nominalzins, der bereits die Preissteigerung beinhaltet, vorgenommen werden. Im Ergebnis würde dies der Verzinsung mit dem Realzinssatz entsprechen, so dass direkt auf den Realzinssatz abgestellt werden kann. [vgl. THEWES, ADDEN (2013)]

⁵⁸² Zur Erhebung der notwendigen Daten wurde auf die Datenbanken der Bundesanstalt Statistik Österreich – STATISTIK AUSTRIA (<http://www.statistik.at>) bzw. der AUSTRIAN ENERGY AGENCY (www.energyagency.at) zurückgegriffen (abgerufen jeweils am 11.11.2014).

Der für die Berechnung anzusetzende Kalkulationszinssatz wird dem deutschen Bewertungsverfahren des Bundesverkehrswegeplans entnommen. Dabei wird ein Realzinssatz von $i = 3,0\%$ vorgegeben.⁵⁸³ Als Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenanalyse dient der Zeitpunkt (bzw. das Jahr) der Inbetriebnahme (vgl. Abbildung 7.3).

Neben der Berechnung mit dem oben genannten Zinssatz von $3,0\%$ wird zur Abschätzung der Relevanz der Folgekosten, eine Berechnung ohne Berücksichtigung eines Kapitalzinssatzes ($i = 0\%$) durchgeführt und den Ergebnissen mit Verzinsung gegenübergestellt (Abbildung 10.6).⁵⁸⁴

10.2.3.1 Ergebnis der Lebenszykluskostenrechnung

Die Lebenszykluskosten für den abgegrenzten Untersuchungsrahmen – unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von $3,0\%$ – betragen $35.374.781\text{ €}$. Die einzelnen Bestandteile der Gesamtkosten können der Matrix in Tabelle 10.10 entnommen werden.

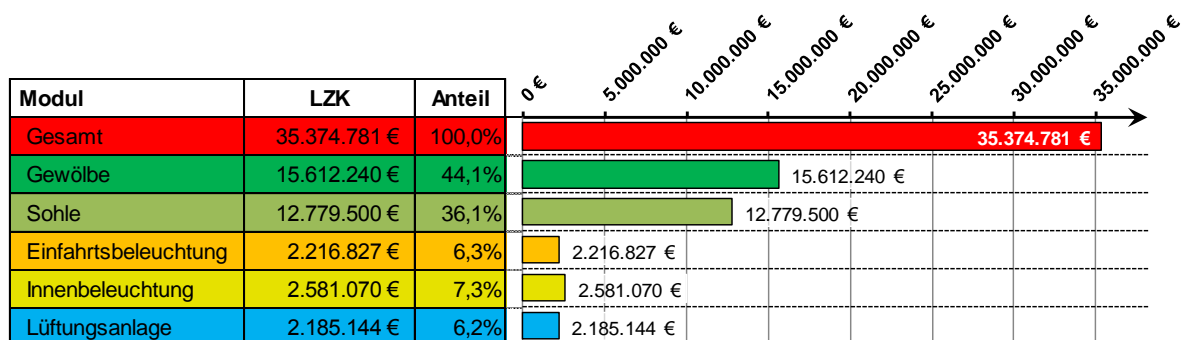
Tabelle 10.10: Zusammenstellung Lebenszykluskosten des Mustertunnels unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von $3,0\%$

	Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Summe Module
Gewölbe	1.692.000 €	10.446.200 €	0 €	262.807 €	801.642 €	153.875 €	2.255.716 €	0 €	15.612.240 €
Sohle	1.742.000 €	11.037.500 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	12.779.500 €
Einfahrtsbeleuchtung	162.000 €	320.100 €	875.295 €	15.211 €	61.701 €	159.728 €	100.724 €	522.068 €	2.216.827 €
Innenbeleuchtung	186.000 €	429.200 €	913.355 €	12.169 €	82.582 €	205.627 €	86.149 €	665.988 €	2.581.070 €
Lüftungsanlage	250.500 €	641.700 €	28.543 €	33.463 €	164.285 €	45.636 €	140.879 €	880.138 €	2.185.144 €
Summe Prozesse	4.032.500 €	22.874.700 €	1.817.193 €	323.650 €	1.110.210 €	564.866 €	2.583.468 €	2.068.194 €	35.374.781 €

Durch das Modulare Prozessmodell als Ausgangsbasis der Kostenstrukturierung ist eine modulweise Auswertung der Lebenszykluskosten gegeben.

Aus der in Tabelle 10.11 bzw. Tabelle 10.12 vorgenommene Zusammenstellung der Lebenszykluskosten ist zu erkennen, dass für den gewählten Untersuchungsumfang und den abgeschätzten Eingangsgrößen, die Module der Baukonstruktion (Gewölbe und Sohle) mit über 80% den weitaus größten Anteil an den Gesamtkosten übernehmen. Die Kosten für die Module der Ausstattung besitzen mit jeweils nur 6% bzw. 7% einen deutlich geringeren Einfluss auf die Gesamtkosten. Hier ist zu berücksichtigen, dass es sich lediglich um einen abgegrenzten Untersuchungsumfang handelt.

Tabelle 10.11: Modulweise Zuordnung der Lebenszykluskosten des Mustertunnels unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von $3,0\%$



⁵⁸³ vgl. BMVBS (2005), Teil II, S. 70

⁵⁸⁴ Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel® der Firma Microsoft. Die Darstellung beschränkt sich auf die relevanten Ergebnisse. Die vollständigen Berechnungstabellen sind dem beiliegenden Datenträger zu entnehmen.

Tabelle 10.12: Zusammenstellung der Einzelteile der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %

Bauwerk System Baugruppe Modul	Prozess	Lebenszykluskosten	Anteil	0 €	5.000.000 €	10.000.000 €	15.000.000 €	20.000.000 €	25.000.000 €	30.000.000 €	35.000.000 €
Mustertunnel		35.374.781 €	100,0%								
Baukonstruktion		28.391.740 €	80,3%								
Innenschale		28.391.740 €	80,3%								
Gewölbe		15.612.240 €	44,1%								
	Planung	1.692.000 €	4,8%								
	Umsetzung	10.446.200 €	29,5%								
	Versorgung	0 €	0,0%								
	Reinigung	262.807 €	0,7%								
	Inspektion	801.642 €	2,3%								
	Wartung	153.875 €	0,4%								
	Instandsetzung	2.255.716 €	6,4%								
	Erneuerung	0 €	0,0%								
Sohle		12.779.500 €	36,1%								
	Planung	1.742.000 €	4,9%								
	Umsetzung	11.037.500 €	31,2%								
	Versorgung	0 €	0,0%								
	Reinigung	0 €	0,0%								
	Inspektion	0 €	0,0%								
	Wartung	0 €	0,0%								
	Instandsetzung	0 €	0,0%								
	Erneuerung	0 €	0,0%								
Ausstattung		6.983.041 €	19,7%								
Beleuchtung		4.797.897 €	13,6%								
Einfahrtsbeleuchtung		2.216.827 €	6,3%								
	Planung	162.000 €	0,5%								
	Umsetzung	320.100 €	0,9%								
	Versorgung	875.295 €	2,5%								
	Reinigung	15.211 €	0,0%								
	Inspektion	61.701 €	0,2%								
	Wartung	159.728 €	0,5%								
	Instandsetzung	100.724 €	0,3%								
	Erneuerung	522.068 €	1,5%								
Innenbeleuchtung		2.581.070 €	7,3%								
	Planung	186.000 €	0,5%								
	Umsetzung	429.200 €	1,2%								
	Versorgung	913.355 €	2,6%								
	Reinigung	12.169 €	0,0%								
	Inspektion	82.582 €	0,2%								
	Wartung	205.627 €	0,6%								
	Instandsetzung	86.149 €	0,2%								
	Erneuerung	665.988 €	1,9%								
Lüftung		2.185.144 €	6,2%								
Lüftungsanlage		2.185.144 €	6,2%								
	Planung	250.500 €	0,7%								
	Umsetzung	641.700 €	1,8%								
	Versorgung	28.543 €	0,1%								
	Reinigung	33.463 €	0,1%								
	Inspektion	164.285 €	0,5%								
	Wartung	45.636 €	0,1%								
	Instandsetzung	140.879 €	0,4%								
	Erneuerung	880.138 €	2,5%								

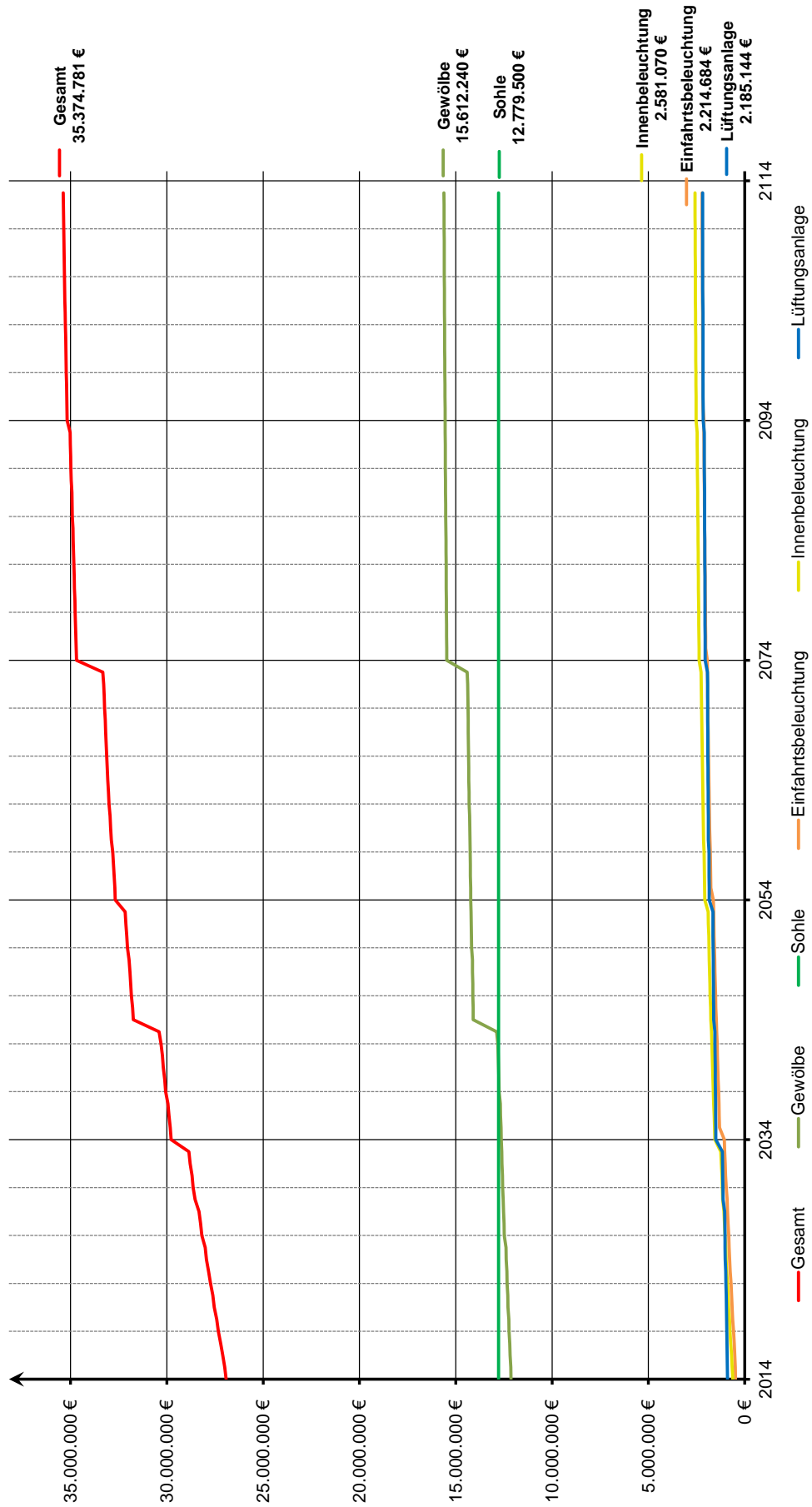


Abbildung 10.5: Verlauf der Lebenszykluskosten des Mustertunnels unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %

10.2.3.2 Bewertung von Erst- und Folgekosten

Die Bewertung der Lebenszykluskosten hinsichtlich der Erst- und Folgekosten zeigt, dass die Kosten der Herstellungsphase mit über 76 % den weitaus größten Anteil einnehmen. (Tabelle 10.13). Dagegen sind die Folgekosten mit rund 24 % deutlich geringer, woraus schlussgefolgert werden kann, dass im vorliegenden Fall deren Einfluss auf die Gesamtkosten sehr begrenzt ist.

Eine prozessweise Auswertung der Lebenszykluskosten identifiziert die Module „Gewölbe“ und „Sohle“ als wesentliche Kostenbestandteile (Tabelle 10.13).

Bei diesen Bewertungen ist zu berücksichtigen, dass lediglich ein beschränkter Untersuchungsumfang einbezogen wurde. Eine Erweiterung des Untersuchungsumfanges auf das vollständige Bauwerk würde zu einer veränderten Verteilung der Erst- und Folgekosten führen.

Tabelle 10.13: Bewertung der Erst- und Folgekosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %

Bauwerk System Baugruppe Modul	Kostenanteil	Lebenszyklus-kosten	Anteil	0 €	5.000.000 €	10.000.000 €	15.000.000 €	20.000.000 €	25.000.000 €	30.000.000 €	35.000.000 €
Mustertunnel		35.374.781 €									
Erstkosten		26.907.200 €	76,1%								
Folgekosten		8.467.581 €	23,9%								
Baukonstruktion		28.391.740 €									
Erstkosten		24.917.700 €	87,8%								
Folgekosten		3.474.040 €	12,2%								
Innenschale		28.391.740 €									
Erstkosten		24.917.700 €	87,8%								
Folgekosten		3.474.040 €	12,2%								
Gewölbe		15.612.240 €									
Erstkosten		12.138.200 €	77,7%								
Folgekosten		3.474.040 €	22,3%								
Sohle		12.779.500 €									
Erstkosten		12.779.500 €	100,0%								
Folgekosten		0 €	0,0%								
Ausstattung		6.983.041 €									
Erstkosten		1.989.500 €	28,5%								
Folgekosten		4.993.541 €	71,5%								
Beleuchtung		4.797.897 €									
Erstkosten		1.097.300 €	22,9%								
Folgekosten		3.700.597 €	77,1%								
Einfahrtsbeleuchtung		2.216.827 €									
Erstkosten		482.100 €	21,7%								
Folgekosten		1.734.727 €	78,3%								
Innenbeleuchtung		2.581.070 €									
Erstkosten		615.200 €	23,8%								
Folgekosten		1.965.870 €	76,2%								
Lüftung		2.185.144 €									
Erstkosten		892.200 €	40,8%								
Folgekosten		1.292.944 €	59,2%								
Lüftungsanlage		2.185.144 €									
Erstkosten		892.200 €	40,8%								
Folgekosten		1.292.944 €	59,2%								

10.2.3.3 Einfluss des Kalkulationszinssatzes

Die Wahl des Zinssatzes beeinflusst das Verhältnis von Erst- und Folgekosten ganz wesentlich. Im vorliegenden Fall verringert sich der Einfluss der Kosten für die Umsetzung bei einem Kalkulationszinssatz von 0,0 % von vormals 65 % auf 40 % (Tabelle 10.15 und Tabelle 10.16). Durch die zeitliche Differenz des Anfallszeitpunktes steigt der Einfluss der Folgekosten (Energieversorgung, Instandsetzung, Erneuerung usw.) gegenüber den Kosten der Herstellungsphase (Tabelle 10.14). Dies zeigt sich beispielsweise im Verhältnis der Erst- und Folgekosten der Tunnelausstattung. Bei einem Kalkulationszinssatz von 3,0 % beträgt das Verhältnis 29 % zu 71 % (Erst- zu Folgekosten). Durch die Veränderung des Zinssatzes auf 0,0 % verschiebt sich das Verhältnis zu Gunsten der Folgekosten auf 11 % zu 89 % (zusammengefasst in Tabelle 10.14 bzw. vergleichend Tabelle 10.13 und Tabelle 10.17). Die Differenz der gesamten Lebenszykluskosten für den begrenzten Untersuchungsumfang beträgt aufgrund der unterschiedlichen Zinssätze ca. 21.273.000 € (+60 %) (Tabelle 10.14).

Der Einfluss des Zinssatzes wird durch den Verlauf der Lebenszykluskosten deutlich sichtbar.⁵⁸⁵ In Abbildung 10.6 ist hierzu der Verlauf der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 % dem Verlauf der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Zinssatzes von 0,0 % gegenübergestellt.

Mit dem Wissen über die Sensitivität der Lebenszykluskosten bezüglich der Höhe des Kalkulationszinssatzes ist, insbesondere hinsichtlich der Umsetzung nachhaltiger Projekte, der Wahl des Zinssatzes eine erhöhte Aufmerksamkeit zu schenken.

Zur weiteren Verdeutlichung dieser Thematik werden in Abs. 10.3.5 weiterführende Untersuchungen auf Basis einer Risikoanalyse vorgenommen.

In der weiteren Bearbeitung wird ein Kalkulationszinssatz von 3,0 % berücksichtigt.

Tabelle 10.14: Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung unterschiedlicher Kalkulationszinssätze

	Lebenszykluskosten Kalkulationszinssatz 3,0 %		Lebenszykluskosten Kalkulationszinssatz 0,0 %		Differenz	Unterschied
		Verhältnis		Verhältnis		
Mustertunnel	35.374.781 €		56.647.970 €		21.273.189 €	+60,1%
Erstkosten	26.907.200 €	76,1%	26.907.200 €	47,5%	0 €	0,0%
Folgekosten	8.467.581 €	23,9%	29.740.770 €	52,5%	21.273.189 €	+251,2%
Baukonstruktion	28.391.740 €	80,3%	38.055.585 €	67,2%	9.663.845 €	+34,0%
Erstkosten	24.917.700 €	87,8%	24.917.700 €	65,5%	0 €	0,0%
Folgekosten	3.474.040 €	12,2%	13.137.885 €	34,5%	9.663.845 €	+278,2%
Ausstattung	6.983.041 €	19,7%	18.592.385 €	32,8%	11.609.344 €	+166,3%
Erstkosten	1.989.500 €	28,5%	1.989.500 €	10,7%	0 €	0,0%
Folgekosten	4.993.541 €	71,5%	16.602.885 €	89,3%	11.609.344 €	+232,5%

⁵⁸⁵ Die Bewertungen beziehen sich jeweils auf den identischen, abgegrenzten Untersuchungsumfang.

Tabelle 10.15: Prozessweise Zuordnung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %

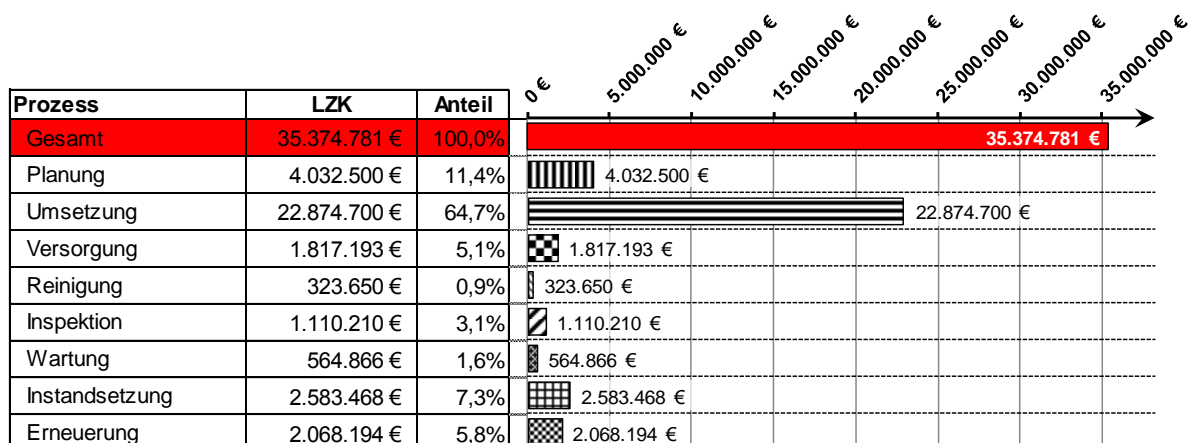


Tabelle 10.16: Prozessweise Zuordnung der Lebenszykluskosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 0,0 %

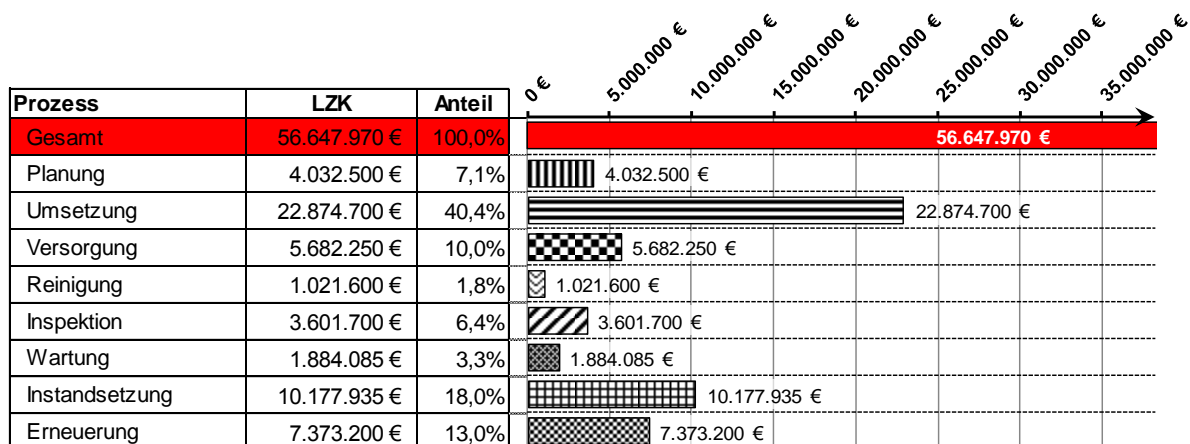


Tabelle 10.17: Bewertung der Erst- und Folgekosten unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 0,0 %

Bauwerk System Baugruppe Modul	Kostenanteil	Lebenszyklus-kosten	Anteil	0 €	5.000.000 €	10.000.000 €	15.000.000 €	20.000.000 €	25.000.000 €	30.000.000 €	35.000.000 €
Mustertunnel	56.647.970 €			56.647.970 €							
Erstkosten	26.907.200 €		47,5%	[Red hatched bar]							
Folgekosten	29.740.770 €		52,5%	[Red diagonal bar]							
Baukonstruktion	38.055.585 €			[Grey bar]							
Erstkosten	24.917.700 €		65,5%	[Grey vertical bar]							
Folgekosten	13.137.885 €		34,5%	[Grey diagonal bar]							
Innenschale	38.055.585 €			[Grey bar]							
Erstkosten	24.917.700 €		65,5%	[Grey vertical bar]							
Folgekosten	13.137.885 €		34,5%	[Grey diagonal bar]							
Gewölbe	25.276.085 €			[Green bar]							
Erstkosten	12.138.200 €		48,0%	[Green vertical bar]							
Folgekosten	13.137.885 €		52,0%	[Green diagonal bar]							
Sohle	12.779.500 €			[Light green bar]							
Erstkosten	12.779.500 €		100,0%	[Light green vertical bar]							
Folgekosten	0 €		0,0%	[Light green diagonal bar]							
Ausstattung	18.592.385 €			[Grey bar]							
Erstkosten	1.989.500 €		10,7%	[Grey vertical bar]							
Folgekosten	16.602.885 €		89,3%	[Grey diagonal bar]							
Beleuchtung	13.250.575 €			[Grey bar]							
Erstkosten	1.097.300 €		8,3%	[Grey vertical bar]							
Folgekosten	12.153.275 €		91,7%	[Grey diagonal bar]							
Einfahrtsbeleuchtung	6.160.305 €			[Yellow bar]							
Erstkosten	482.100 €		7,8%	[Yellow vertical bar]							
Folgekosten	5.678.205 €		92,2%	[Yellow diagonal bar]							
Innenbeleuchtung	7.090.270 €			[Yellow bar]							
Erstkosten	615.200 €		8,7%	[Yellow vertical bar]							
Folgekosten	6.475.070 €		91,3%	[Yellow diagonal bar]							
Lüftung	5.341.810 €			[Grey bar]							
Erstkosten	892.200 €		16,7%	[Grey vertical bar]							
Folgekosten	4.449.610 €		83,3%	[Grey diagonal bar]							
Lüftungsanlage	5.341.810 €			[Blue bar]							
Erstkosten	892.200 €		16,7%	[Blue vertical bar]							
Folgekosten	4.449.610 €		83,3%	[Blue diagonal bar]							

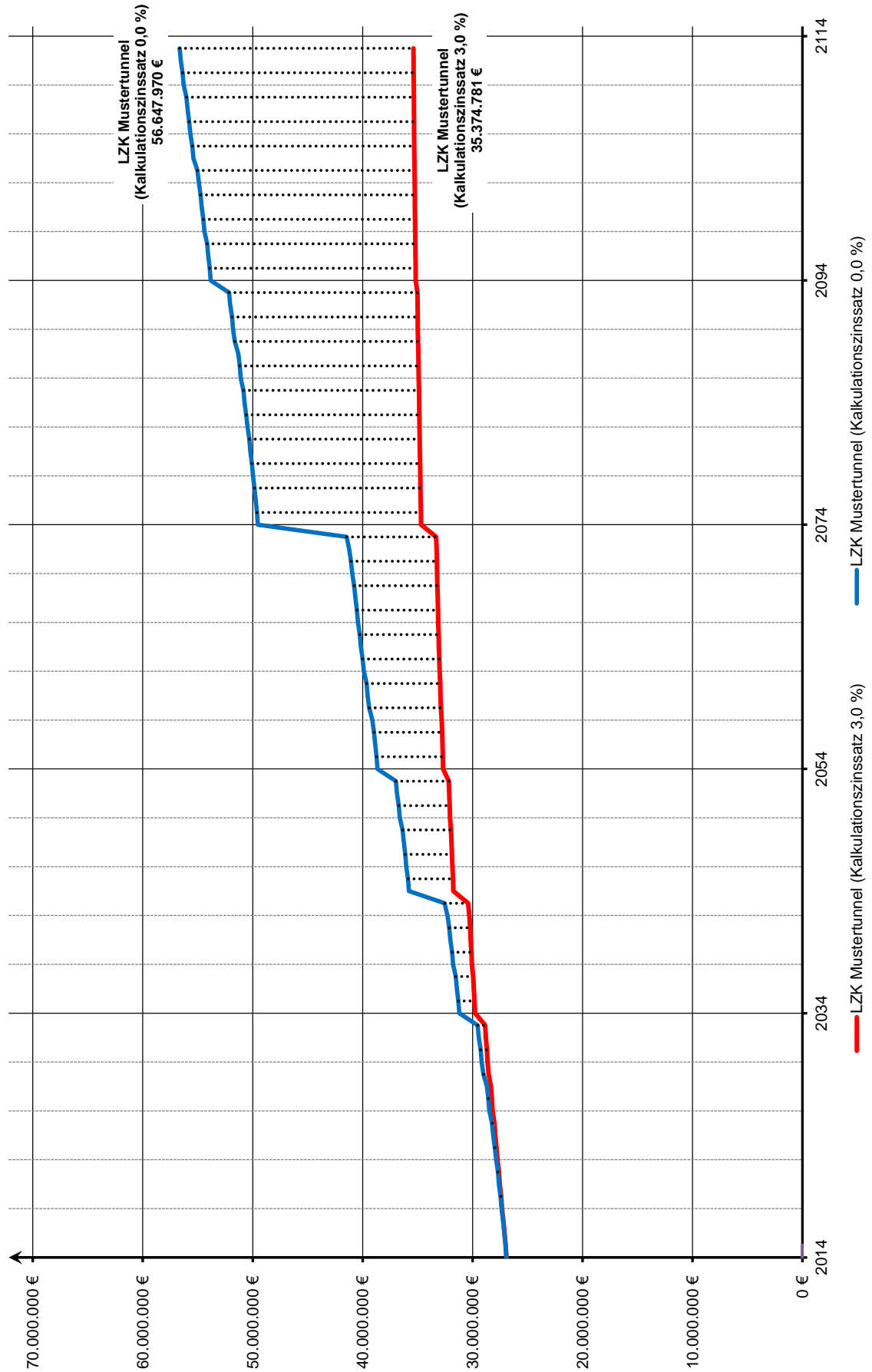


Abbildung 10.6: Gegenüberstellung des Verlaufs der Lebenszykluskosten mit und ohne Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes

10.2.4 Identifikation von Optimierungsansätzen

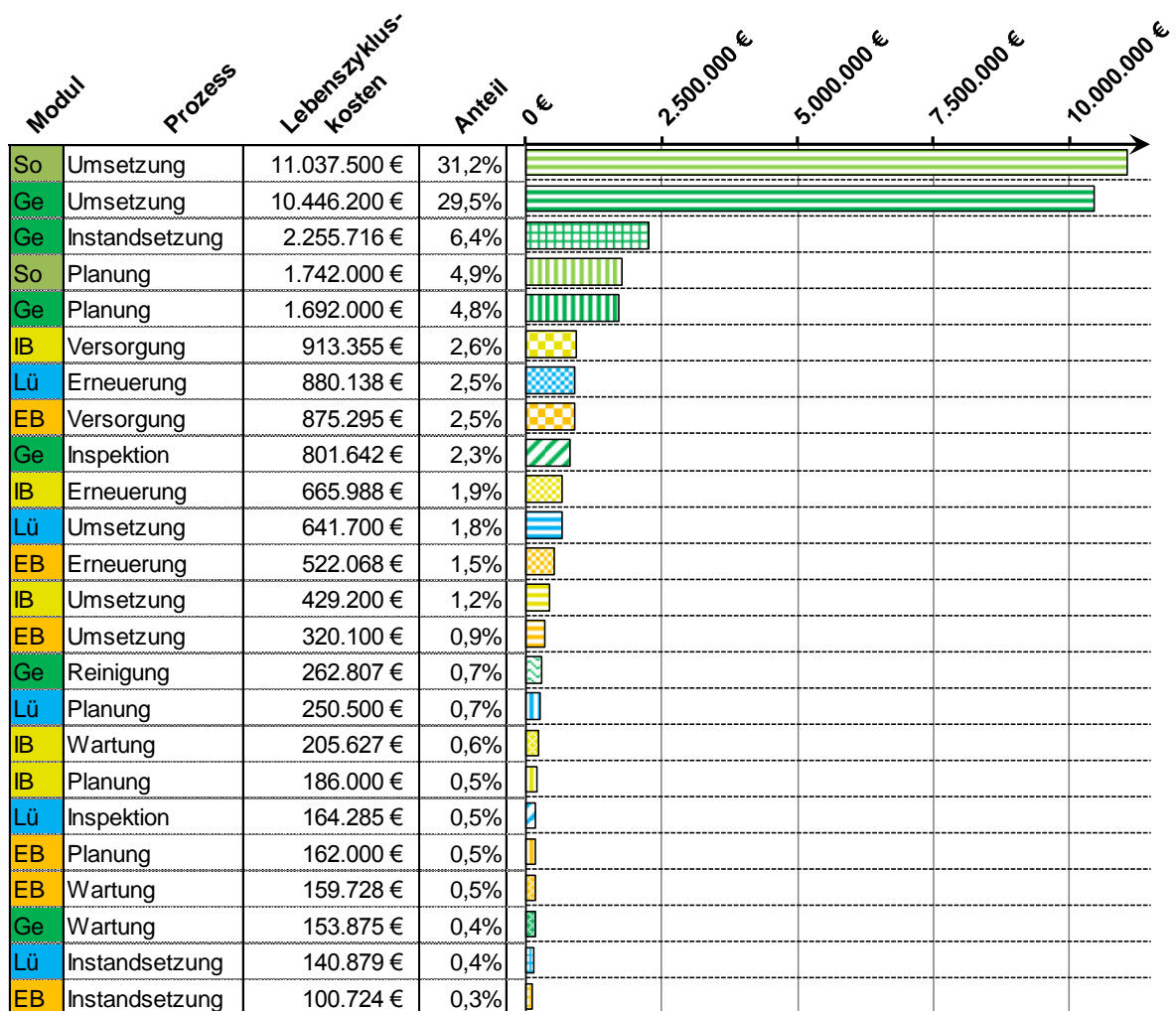
Zur Auflösung der Komplexität der gesamten Lebenszykluskosten des Untersuchungsrahmens wurde im Abs. 10.2.3 eine erste Auswertung der Kosten hinsichtlich der Module bzw. Prozess vorgenommen.

Um Kenntnis darüber zu erlangen, welche Größen die Lebenszykluskosten wesentlich beeinflussen, wird nachfolgend eine Bewertung der einzelnen Kostenbestandteile vorgenommen. Darauf aufbauend erfolgt eine Untersuchung der Sensitivität einzelner Kostengrößen zur Abschätzung der Möglichkeiten für eine Kostenoptimierung.

10.2.4.1 Bewertung der Kostenbestandteile

Für eine Bewertung der Kosten wird eine Rangfolgenbildung der einzelnen Bestandteile hinsichtlich ihrer Größe vorgenommen (Tabelle 10.18). Die dadurch als Leitgrößen identifizierten Prozesse werden anschließend auf ihre Optimierungspotentiale untersucht. Für geeignete Größen erfolgt darauf aufbauend eine Sensitivitätsanalyse zur weiteren Eingrenzung von Optimierungsmöglichkeiten. Dabei wird auf die Ergebnisse der Lebenszykluskosten mit einem Kalkulationszinssatz von 3,0 % zurückgegriffen.

Tabelle 10.18: Rangfolgenbildung der Kostenbestandteile der Lebenszykluskosten⁵⁸⁶



Ge = Gewölbe | So = Sohle | EB = Einfahrtsbeleuchtung | IB = Innenbeleuchtung | Lü = Lüftung

⁵⁸⁶ Zur Eingrenzung der Darstellung sind nur die wesentlichen Kostengrößen (> 100.000 €) aufgetragen.

Wie der Rangfolge in Tabelle 10.18 zu entnehmen ist, handelt es sich bei den Leitgrößen des vorliegenden Projektes um die Planungs- und Umsetzungskosten für die Baukonstruktion. Deren grundsätzliche Optimierung ist Bestandteil existierender Modelle, auf die an dieser Stelle verwiesen wird (z. B. STEIGER (2009)).

Aus diesem Grund handelt sich bei der ersten relevanten Leitgröße um die Kosten für die Instandsetzung des Gewölbes. Diese werden zwar im Wesentlichen durch die Planung und Umsetzung in der Herstellungsphase geprägt. Allerdings bieten sich hier auch weitere Potentiale über zusätzliche Schutzmaßnahmen, wie z. B. durch Aufbringen einer Beschichtung. Hierfür ist zu untersuchen, wie sensibel diese Größe auf Veränderung hinsichtlich Umfang und Häufigkeit der Instandsetzungsmaßnahmen reagiert, so dass Rückschlüsse auf Optimierungsansätze möglich werden.

Zweite Leitgröße ist der Energieverbrauch der Beleuchtungsanlage (Versorgung Einfahrts- und Innenbeleuchtung). Bei eingehender Betrachtung zeigt sich zudem, dass diese Größen in direkter Korrelation zu den Kosten für die Planung, Umsetzung, Reinigung, Wartung und Erneuerung des jeweiligen Moduls stehen. Hierdurch vergrößert sich das Optimierungspotential. So erlaubt ein geringerer Energieverbrauch, beispielsweise durch Verringerung der erforderlichen Leuchtdichte, die Reduzierung der Leuchtenanzahl und führt dadurch zu geringeren Herstellkosten. Weitergehend resultieren hieraus geringere Kosten für die Reinigung, für den regelmäßigen Leuchtmitteltausch (Wartung), den nicht planmäßigen Leuchtenausfall (Instandsetzung) und für die Erneuerung der Beleuchtung.

Zusätzlich ist die Erneuerung, und damit die geplante Nutzungsdauer der Beleuchtungs- und Lüftungsanlage, als signifikante Größen zu identifizieren. Dabei ist anzunehmen, dass Bauteile mit einer größeren Dauerhaftigkeit höhere Investitionskosten bedingen. Allerdings können an dieser Stelle diese Kostengrößen nur bedingt untersucht werden, da über die Lebensdauern der einzelnen Elemente sowie zu höheren Umsetzungskosten bislang kaum belastbare Größen und Korrelationen vorliegen.

Weitere wesentliche Kostenbestandteile und daraus resultierend zusätzliche Optimierungsansätze würden sich durch die Einbindung weiterer Module in den Untersuchungsrahmen ergeben. Die Untersuchungen und weitere Vorgehensweise begrenzen sich allerdings auf den vorgegebenen Untersuchungsrahmen.

10.2.4.2 Sensitivitätsanalyse

Die Bewertung der Sensitivität der Lebenszykluskosten wird ausgehend von den unter Abs. 10.2.4.1 als relevant identifizierten Prozessen vorgenommen. Folgende Prozesse werden hierzu detaillierter untersucht:

- Instandsetzung Gewölbe
- Versorgung Einfahrtsbeleuchtung
- Versorgung Innenbeleuchtung
- Erneuerung Beleuchtung (Einfahrts- und Innenbeleuchtung)
- Erneuerung Lüftung

Die Umsetzung der Sensitivitätsanalyse erfolgt auf Basis der Ceteris-paribus-Klausel durch Veränderung einer Eingangsgröße. Dazu wird der jeweilige Leistungsumfang durch prozentuale Auf- bzw. Abschläge geändert und das Ergebnis der Veränderung der Eingangsgröße gegenübergestellt. Für eine bessere Übersichtlichkeit wird zur Veranschaulichung auf prozentuale, anstelle monetärer Größen, abgestellt (Abbildung 10.7).

Zur Bewertung der Veränderungen der Eingangsgrößen werden jeweils vier Teilschritte (-25 %, -12,5 %, +12,5 %, +25 %) untersucht.

Zur Verdeutlichung des Einflusses auf die Gesamtkosten dienen im ersten Schritt die Lebenszykluskosten des Untersuchungsrahmens (Summe aller Module) als Vergleichsgröße (Tabelle 10.19). Zur Bewertung des Einflusses der Versorgung wurden die beiden Module „Einfahrtsbeleuchtung“ und „Innenbeleuchtung“ zur „Beleuchtung“ zusammengefasst. Gleichzeitig wird bei der Versorgung der Beleuchtung auch der Einfluss auf die weiteren Prozesse der beiden Module berücksichtigt. Zur besseren Veranschaulichung sind in Abbildung 10.7 die einzelnen Ergebnisse zusätzlich in Diagrammform dargestellt.

Tabelle 10.19: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten bezogen auf die Lebenszykluskosten des Untersuchungsrahmens

Instandsetzung Gewölbe					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-12,5 %	0 %	+12,5 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	34.810.854 €	35.092.818 €	35.374.781 €	35.656.745 €	35.938.692 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	-1,6 %	-0,8 %	0,0 %	+0,8 %	+1,6 %
Versorgung Beleuchtung					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-12,5 %	0 %	+12,5 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	34.379.773 €	34.914.033 €	35.374.781 €	35.820.184 €	36.327.713 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	-2,8 %	-1,3 %	0,0 %	+1,3 %	+2,7 %
Erneuerung Leuchten					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-10,0 %	0 %	+10,0 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	35.853.878 €	35.553.340 €	35.374.781 €	35.279.313 €	35.089.526 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	+1,4 %	+0,5 %	0,0 %	-0,3 %	-0,8 %
Erneuerung Lüfter					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-10,0 %	0 %	+10,0 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	35.698.452 €	35.503.907 €	35.374.781 €	35.328.350 €	35.198.720 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	+0,9 %	+0,4 %	0,0 %	-0,1 %	-0,5 %

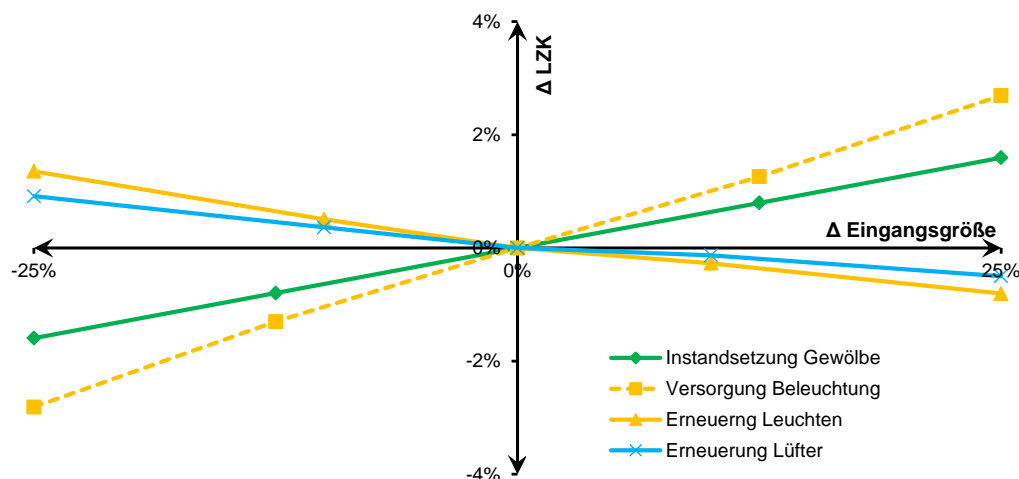


Abbildung 10.7: Auswertung der Sensitivität der Lebenszykluskosten [in %]⁵⁸⁷

⁵⁸⁷ Der nichtlineare Verlauf der Kosten für die Erneuerung der Leuchten bzw. Lüfter ist darauf zurückzuführen, dass durch die Änderung der Instandsetzungszyklen eine unterschiedliche Anzahl an Austauschvorgängen zu verzeichnen ist, die sich nur bei überschreiten bestimmter Größen ändert. (Zyklus = 20 Jahre - Häufigkeit = 4; Zyklus = 22 Jahre - Häufigkeit = 4; Zyklus = 25 Jahre - Häufigkeit = 3)

Den Ergebnissen der ersten Sensitivitätsanalyse (Tabelle 10.19 bzw. Abbildung 10.7) ist zu entnehmen, dass Veränderungen der einzelnen Eingangsgrößen nur einen sehr begrenzten Einfluss auf die gesamten Lebenszykluskosten des Untersuchungsrahmens ausüben (max. $\pm 3\%$). Um die Relevanz hinsichtlich der Kosten des eigenen Moduls zu analysieren, werden nachfolgend die Veränderungen den jeweiligen Lebenszykluskosten des untersuchten Moduls gegenübergestellt (Tabelle 10.20 bzw. Abbildung 10.8). Alternativ können durch die entwickelte Strukturierung alle Ebenen (Bauwerk-, System-, Bauteil-, Modulebene) bzw. Prozesse als Bezugsgröße dienen. Die Feststellung ist projektspezifisch vorzunehmen.

Tabelle 10.20: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskosten bezogen auf die Lebenszykluskosten des jeweiligen Moduls

Instandsetzung Gewölbe					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-12,5 %	0 %	+12,5 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	15.048.313 €	15.330.277 €	15.612.240 €	15.894.204 €	16.176.151 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	-3,6 %	-1,8 %	0,0 %	+1,8 %	+3,6 %
Versorgung Einfahrtsbel.					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-12,5 %	0 %	+12,5 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	1.756.938 €	2.003.129 €	2.216.827 €	2.415.670 €	2.650.314 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	-20,7 %	-9,6 %	0,0 %	+9,0 %	+19,6 %
Versorgung Innenbel.					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-12,5 %	0 %	+12,5 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	2.052.292 €	2.337.194 €	2.581.070 €	2.821.291 €	3.091.006 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	-20,5 %	-9,4 %	0,0 %	+9,3 %	+19,8 %
Erneuerung Leuchten					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-10,0 %	0 %	+10,0 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	5.276.994 €	4.976.456 €	4.797.897 €	4.702.429 €	4.512.642 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	+10,0 %	+3,7 %	0,0 %	-2,0 %	-5,9 %
Erneuerung Lüfter					
Δ Eingangsgröße [%]	-25 %	-10,0 %	0 %	+10,0 %	+25 %
Lebenszykluskosten [€]	2.508.815 €	2.314.270 €	2.185.144 €	2.138.713 €	2.009.083 €
Δ Lebenszykluskosten [%]	+14,8 %	+5,9 %	0,0 %	-2,1 %	-8,1 %

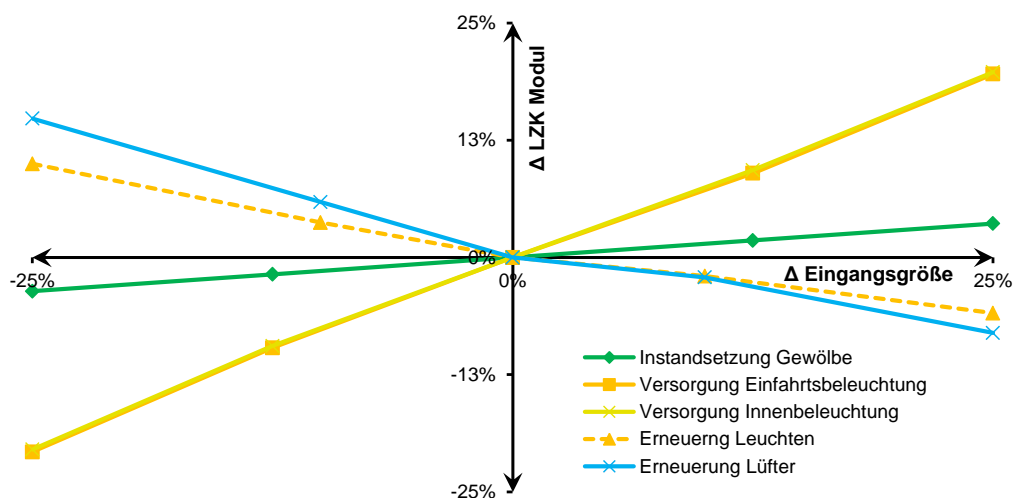


Abbildung 10.8: Auswertung der Sensitivität der Lebenszykluskosten bezogen auf die Lebenszykluskosten des jeweiligen Moduls [in %]

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass insbesondere Einsparungen im Bereich der Tunnelbeleuchtung, die Lebenszykluskosten positiv beeinflussen. Bezogen auf die Lebenszykluskosten des gesamten Untersuchungsrahmens ist der Optimierungsansatz prozentual gesehen zwar sehr gering, bezogen auf die monetären Kostengrößen allerdings als lohnenswert zu betrachten. Dies wird besonders deutlich, wenn als Bezugsgröße die Lebenszykluskosten des Moduls herangezogen werden (Abbildung 10.8).

Bei den Optimierungsansätzen für die Instandsetzung des Tunnelgewölbes ist dies weit weniger deutlich. Dies liegt – insbesondere beim Bezug zu den Lebenszykluskosten des Moduls – an den im Vergleich sehr hohen Herstellkosten des Gewölbes. Werden stattdessen die monetären Kostengrößen verglichen, sind auch hier Optimierungspotentiale zu erkennen.

Aus dieser Analyse heraus werden nachfolgend Optimierungsansätze sowohl für die Beleuchtung als auch für die Instandsetzungsaufwendungen des Tunnelgewölbes untersucht.

10.2.5 Untersuchung und Bewertung von Optimierungsansätzen

Die unter Abs. 10.2.4 identifizierten, übergeordneten Optimierungsansätzen sind im weiteren Schritt auf die operative Ebene zu übertragen. Dazu sind Möglichkeiten herauszuarbeiten, wie diese Potentiale umgesetzt werden können. Das bedeutet, es müssen Ansätze gefunden werden, wie die einzelnen Kosten gezielt reduziert werden können. Anschließend ist zu untersuchen, ob die identifizierten Optimierungsmöglichkeiten des einzelnen Moduls bzw. des jeweiligen Prozesses, bezogen auf den gesamten Untersuchungsumfang, eine Reduzierung der Lebenszykluskosten bewirken. Dazu ist zu beachten, dass bei jeder Veränderung der einzelnen Module bzw. Prozesse, mit Hilfe der herausgearbeiteten Schnittstellen, die Auswirkungen auf andere Prozesse oder Module in die Bewertung einzubeziehen sind. Nur durch eine entsprechende ganzheitliche Untersuchung ist eine sachlich richtige, ökonomische Bewertung abschließend möglich. Zur Identifikation der Interdependenzen ist auf die erhobenen Schnittstellen der jeweiligen Module (Abs. 10.2.2) zurückzugreifen. Dabei gilt es auch Einflüsse auf Module zur berücksichtigen, die im Gesamtbauwerk integriert sind, allerdings in den Untersuchungsumfang bislang nicht einbezogen wurden (z. B. USV-Anlage).

Im Rahmen dieser Arbeit soll lediglich die Umsetzbarkeit der entwickelten Vorgehensweise aufgezeigt werden. Aus diesem Grund wird der Untersuchungsumfang auf zwei wesentliche Optimierungsansätze beschränkt:

- Reduzierung der Versorgungskosten für die Beleuchtung durch vermehrte Reinigung des Tunnelgewölbes.
- Reduzierung der Instandsetzungskosten sowie der Kosten für die Energieversorgung der Tunnelbeleuchtung durch Aufbringen einer Oberflächenbeschichtung am Tunnelgewölbe. Zusätzlich ist hierdurch eine Verringerung der Aufwendungen und damit der Kosten für die Tunnelreinigung einzubeziehen.

10.2.5.1 Reduzierung des Energieverbrauchs der Beleuchtung durch Tunnelreinigung

Die Kosten für die Versorgung der Einfahrts- und Innenbeleuchtung wurden in Abs. 10.2.4 als Optimierungsansatz identifiziert. Aus der Erhebung der Schnittstellen für die Module ist bekannt, dass durch die Tunnelreinigung eine Aufhellung des Tunnelgewölbes erzielt werden kann (Anhang A.2 – Abs. A.2.1.1.8). Die damit einhergehende Verbesserung der Reflexionseigenschaften führt dazu, dass zur Erzielung der erforderlichen Leuchtdichte weniger Energie für die Beleuchtung aufgewendet werden muss. In welcher Größenordnung Einsparungen im Energieverbrauch durch eine Tunnelreinigung erzielt werden können, wurde bislang weder wissenschaftlich untersucht noch in sonstiger Form veröffentlicht. Erfahrungen aus der Praxis zeigen aber, dass durch Reinigung der Tunnelwände eine Energieeinsparung von 15 bis 20 % zu erzielen ist.⁵⁸⁸

Die ökonomische Bewertung, inwieweit durch die angedachten Maßnahmen Einsparungen bei den Gesamtkosten zu erzielen sind, bedarf einer Einbindung aller relevanten Module. Aus der Erhebung der Schnittstellen ist bekannt, dass die Aufhellung der Tunnelwände (beispielsweise durch Reinigung) Einfluss auf den Energiebedarf und damit auf die Kosten für die Versorgung hat. Eine Verkleinerung der gesamten Beleuchtungsanlagen wird aufgrund der begrenzten Ausprägung in diesem Fall allerdings nicht vorgenommen. Eine Berücksichtigung der USV-Anlage, bei der eine weitergehende Interdependenz zur Beleuchtungsanlage vorliegt, ist letztlich nicht notwendig. Aus der Schnittstellenmatrix des Untersuchungsrahmens (Tabelle 10.9) ist abzuleiten, dass eine Einbeziehung weiterer Module nicht erforderlich ist (Abbildung 10.9).

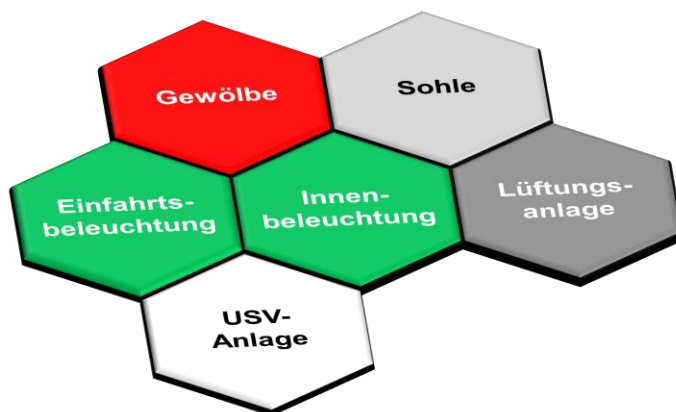


Abbildung 10.9: Auslösendes Modul (rot) und betroffene Module (grün) aus dem Untersuchungsrahmen – Variante 1

Zur Untersuchung und Bewertung wird von einer Reduzierung des Energieverbrauchs um 20 % infolge des Reinigungsvorgangs ausgegangen. Basis ist eine jährliche Reinigung des Tunnels. Bezogen auf die angestrebte zweimalige Reinigung der Tunnellaibung würde dies zu einer Reduzierung des Energiebedarfs (unmittelbar nach der Reinigung) um 10 % führen. Der mittlere Energiebedarf, der für die Berechnung der Lebenszykluskosten herangezogen wird, würde dadurch um 5 % zurückgehen (Abbildung 10.10). Vereinfacht wird dieser Ansatz für die Module „Einfahrtsbeleuchtung“ und „Innenbeleuchtung“ gleichermaßen übernommen.

⁵⁸⁸ Nicht protokollierte Aussage eines Tunnelbetreibers.

Basis ist eine jährlich einmalige Reinigung von Tunnelbauwerken an Bundesstraßen und Autobahnen.

Zusätzlich führt die vermehrte Reinigung zu einer Reduzierung des Reinigungsaufwandes, da der Verschmutzungsgrad der Tunnelwände ebenfalls abnimmt. Dies wird durch eine Erhöhung der Arbeitsgeschwindigkeit des Reinigungswagens von vormals 1,0 km/h auf 1,25 km/h (Zeitersparnis 20 %), durch Reduzierung des Arbeitsaufwandes für die händische Reinigung um 20 % sowie einen Minderverbrauch an Reinigungsmittel von 50 % in der Kostenberechnung berücksichtigt (Anhang A.4 – Abs. A.4.1).

Bei den hier zusätzlich angesetzten Reinigungsvorgängen wird lediglich das Gewölbe bis in eine Höhe von 3,00 m über der Fahrbahn gereinigt. Die Intervalle für eine vollständige Reinigung des Tunnelgewölbes bleiben unverändert und erfolgen wie bisher im Austausch mit einer Teilflächenreinigung. Dabei wird der Anteil für die Bereiche mit einer vermehrten Reinigung (bis 3,00 m Höhe) entsprechend den getroffenen Ansätzen reduziert.

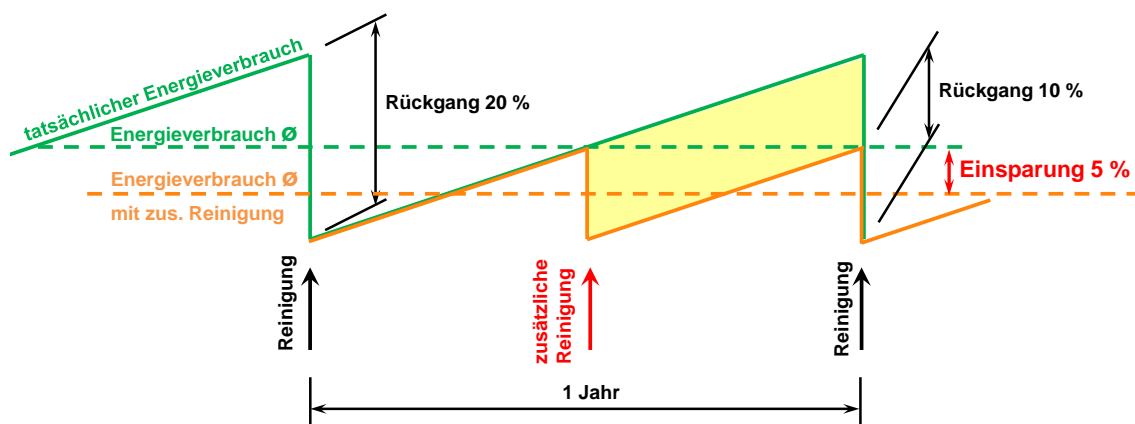


Abbildung 10.10: Visualisierung der Energieeinsparung aus Reinigung

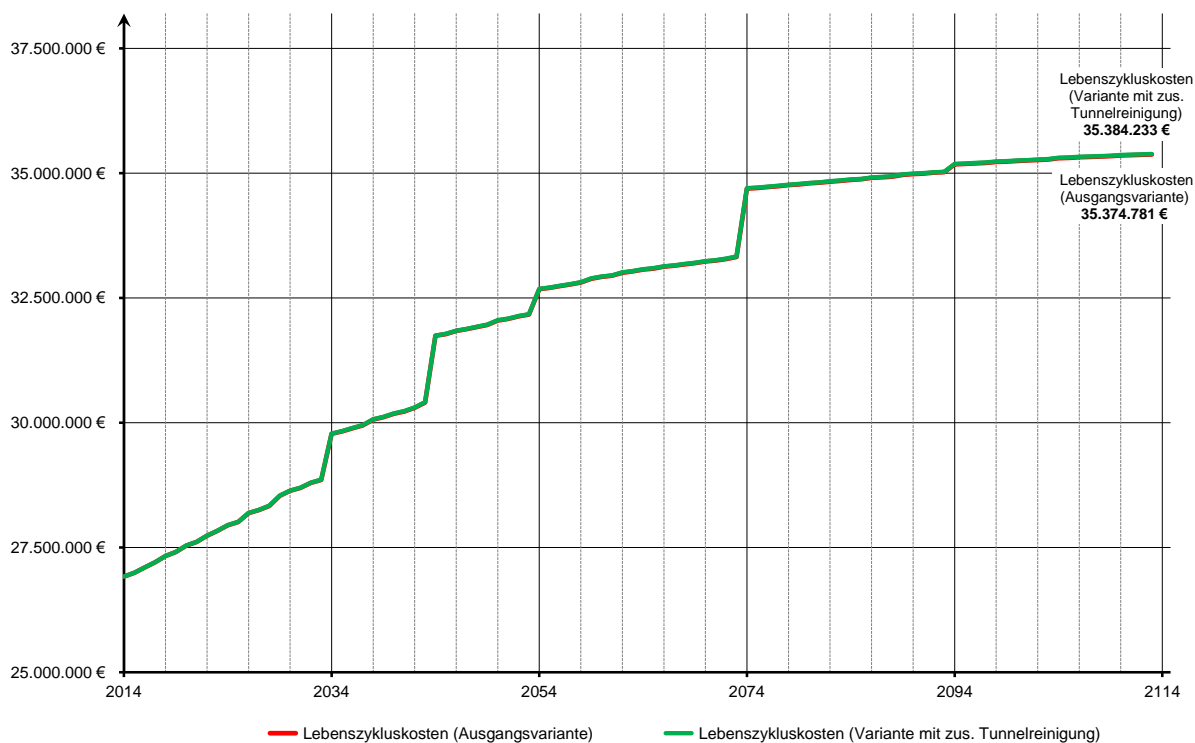
Bewertung der Vorteilhaftigkeit des Optimierungsansatzes

Die Berechnung der Lebenszykluskosten für die Variante mit einer zusätzlichen, jährlichen Tunnelreinigung zeigt, dass eine Gesamtkostenoptimierung nicht erzielt werden kann (Tabelle 10.21; Abbildung 10.11). Mit den vorliegenden Parametern und den gewählten Ansätzen ist grundsätzlich eine Reduzierung der Lebenszykluskosten für die Versorgung der Tunnelbeleuchtung von jeweils rund 5 % zu verzeichnen. Im Gegenzug steigen die Lebenszykluskosten für die häufigere Reinigung im gleichen Maß, so dass sich letztlich die angestrebte Kostenreduzierung, mit den vorliegenden Eingangsgrößen, nicht realisieren lässt (Tabelle 10.21). Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Einsparungspotential mit 20 % an der oberen Grenze angesetzt wurde. Zudem sind die gewählten Ansätze bislang nicht belastbar nachweisbar, so dass grundsätzlich mit geringeren Einsparungen zu rechnen ist.

Die bestehenden Unsicherheiten in den gewählten Ansätzen und der letztlich sehr geringe Einfluss auf die Lebenszykluskosten des Untersuchungsgegenstandes führen dazu, dass eine Umsetzung des Optimierungsansatzes kaum zu empfehlen ist. Allerdings kann aufgrund der Tatsache, dass keine Investitionen notwendig werden, in einer Testphase während des Betriebs, bzw. an vergleichbaren Bauwerken, eine Verifizierung der Daten und darauf aufbauend, eine neue Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit vorgenommen werden.

**Tabelle 10.21: Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten
Ausgangsvariante und Variante mit zus. Reinigung**

Bauwerk System Baugruppe Modul	Prozess	LZK Ausgangs- variante	LZK mit zus. Reinigung	Differenz	Veränderung
Mustertunnel		35.374.781 €	35.384.233 €	+9.452 €	+0,03 %
Baukonstruktion		28.391.740 €	28.493.169 €	+101.429 €	+0,36 %
Innenschale		28.391.740 €	28.493.169 €	+101.429 €	+0,36 %
Gewölbe		15.612.240 €	15.713.669 €	+101.429 €	+0,65 %
Reinigung		262.807 €	364.236 €	+101.429 €	+38,59 %
Ausstattung		6.983.041 €	6.891.064 €	-91.977 €	-1,32 %
Beleuchtung		4.797.897 €	4.705.920 €	-91.977 €	-1,92 %
Einfahrtsbeleuchtung		2.216.827 €	2.172.423 €	-44.404 €	-2,00 %
Versorgung		875.295 €	830.891 €	-44.404 €	-5,07 %
Innenbeleuchtung		2.581.070 €	2.533.497 €	-47.573 €	-1,84 %
Versorgung		913.355 €	865.782 €	-47.573 €	-5,21 %



**Abbildung 10.11: Gegenüberstellung des Verlaufs der Lebenszykluskosten
Ausgangsvariante und Variante mit zus. Tunnelreinigung**

10.2.5.2 Reduzierung des Instandsetzungsaufwandes durch Aufbringen einer Beschichtung im Bereich des Tunnelgewölbes

Für die Lebenszykluskosten des Untersuchungsgegenstandes konnten durch die Bewertung in Abs. 10.2.4 die Instandsetzungskosten des Tunnelgewölbes und die Versorgungskosten für die Tunnelbeleuchtung als wesentliche Kostentreiber und Einflussgrößen identifiziert werden. Die vorgenommene Sensitivitätsanalyse zeigt die Möglichkeit auf, dass durch eine gleichzeitige Optimierung der beiden Kostengrößen eine Reduzierung der Gesamtkosten zu erzielen ist.

In Kenntnis der in Abs. 10.2.2 bestimmten Schnittstellen führt das Aufbringen einer Beschichtung im Bereich des Tunnelgewölbes zur Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Betonkonstruktion und dadurch zu reduzierten Aufwendungen für die Wartung und Instandsetzung. Zudem wird durch die Versiegelung und Glättung der Gewölbeoberfläche ein Anhaften von Schmutzpartikeln erschwert, was den Aufwand für die Reinigungsarbeiten reduziert. Gleichzeitig kann durch die Farbwahl der Beschichtung, die Systemleistung der Beleuchtungsanlage verringert werden. Durch die verbesserten Reflexionseigenschaften sind trotz gleichbleibender Anforderungen an die Leuchtdichte, weniger Leuchten erforderlich. Dies führt zu Einsparungen bei der Umsetzung sowie der Reinigung, Wartung, Instandsetzung und Erneuerung im Bereich der Tunnelbeleuchtung (Einfahrts- und Innenbeleuchtung).

Zur Bewertung des Optimierungsansatzes ist der Untersuchungsrahmen durch ein zusätzliches Modul „Beschichtung“ in der Baugruppe Innenschale zu erweitern. Aus Sicht einer ganzheitlichen Betrachtung sind dabei die Auswirkungen auf die weiteren Module für den Nachweis einer ökonomischen Vorteilhaftigkeit zu berücksichtigen und in die Gesamtkostenrechnung einzubinden. Der aus ökonomischer Sicht positive Einfluss einer geringeren Systemleistung der Beleuchtungsanlage auf die Dimension der USV-Anlage bleibt an dieser Stelle unberücksichtigt (Abbildung 10.12).

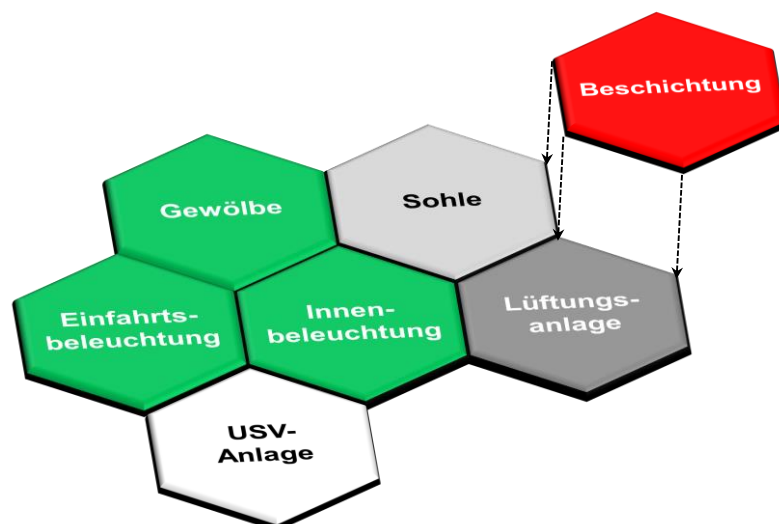


Abbildung 10.12: Auslösendes Modul Beschichtung (rot) und betroffene Module (grün) aus dem Untersuchungsrahmen – Variante 2

Die Erhebung der Attribute für das zusätzliche Modul „Beschichtung“ wird in Anhang A.4 – Abs. A.4.2 vorgenommen. In Tabelle 10.22 sind die für das Modulare Prozessmodell wesentlichen Größen zusammengefasst.

Tabelle 10.22: Zusammenstellung der Attribute für das Modul „Beschichtung“

Parameter		Elemente		Anzahl
Tunnellänge		Beschichtung UG ₂ (Wand bis 3,00 m Höhe)		28.800 m ²
Querschnittsgröße, QS-Umfang, Geometrie		(Spachtelung mit mind. 2,00 mm Schichtdicke)		
Beschichtungsfläche		Beschichtung UG ₁ (Wand über 3,00 m Höhe)		58.560 m ²
Schutzziele		Hydrophobierung		
Untergrundbeschaffenheit				

Prozesse	Leistungen	Kosten	Zeitliche Parameter	Schnittstellen
Planung	Erstellung Planungsunterlagen, Prüfung, Bauüberwachung, Verwaltung, Projektmanagement	22.800 €	-	-> siehe Umsetzung
Umsetzung	Vorbereitung Untergrund, Aufbringen Beschichtung und Hydrophobierung, Nachbehandlung	754.300 €	-	Beschichtungsfläche, Tunnellänge, Untergrund <-> Beleuchtung, <-> Gewölbe (Reinigung, Instands.)
Versorgung				
Reinigung				
Inspektion				
Wartung				
Instandsetzung				
Erneuerung	Beschichtung und Hydrophobierung	1.266.500 €	alle 20 Jahre	Oberflächengüte, Umgebungsbeding., Instandhaltungsstrateg., gepl. Nutzungsdauer, Lebensdauer, Beschichtungsfläche, -> siehe Umsetzung
Modernisierung				

Zur ganzheitlichen Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit des Optimierungsansatzes sind die Auswirkungen auf die anderen Module und deren Prozesse in die Lebenszykluskostenrechnung einzubeziehen. Folgende Anpassungen sind hierzu vorzunehmen:

- **Modul Gewölbe – Prozess Reinigung**
Die verbesserte Oberflächenqualität erschwert ein Anhaften von Schmutzpartikeln. Gleichzeitig verringert sich der Aufwand für die Reinigungsarbeiten. Aus diesem Grund wird für die jährliche Reinigung der Tunnelwände (bis 3,00 m Wandhöhe) eine Reduzierung des Aufwandes um 40 % abgeschätzt. Zusätzlich wird auf das Vorsprühen sowie den Einsatz von Reinigungsmitteln verzichtet (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.4).
- **Modul Gewölbe – Prozess Inspektion (Prüfung bzw. Wartung)**
Die Aufwendungen für die Bauwerksprüfung werden wesentlich durch den Zustand des Bauwerkes bestimmt. Mit dem Einsatz von Oberflächenschutzsystemen wird eine Erhöhung der Dauerhaftigkeit der Betonkonstruktion angestrebt, so dass davon auszugehen ist, dass über den gesamten Lebenszyklus ein verbesserter Bauwerkszustand vorliegt. Zur Kalkulation der Kosten für die Inspektion wird deshalb von einem guten Zustand (Zustandsfaktor 0,60) als mittlerer Bauwerkszustand ausgegangen (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.5).⁵⁸⁹
- **Modul Gewölbe – Prozess Wartung**
Der dauerhafte Schutz erlaubt einen Verzicht der jährlichen Zunahme der Aufwendungen für die Wartungsarbeiten.
- **Modul Gewölbe – Prozess Instandsetzung**
Aus der erhöhten Dauerhaftigkeit resultiert eine Reduzierung der Schäden an der Betonkonstruktion. Im Umkehrschluss verringern sich die Aufwendungen für die beiden geplanten Instandsetzungen der Betonkonstruktion im erheblichen Umfang (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.6). Durch die Oberflächenschutzsysteme wird zudem eine Verlangsamung der Schädigung erreicht, so dass die Instandsetzungsarbeiten zu einem späteren Zeitpunkt erforderlich sind. Die Instandsetzung des Tunnelgewölbes erfolgt im Zuge der Erneuerung der Beschichtung nach 40 Jahren bzw. nach 80 Jahren.

Die Auswirkungen auf die Prozesse der Beleuchtung sind für die Module „Einfahrtsbeleuchtung“ und „Innenbeleuchtung“ nahezu identisch. Nachfolgend wird deshalb lediglich auf das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“ eingegangen. Für die Prozesse der Innenbeleuchtung sind die Ansätze sinngemäß zu übertragen.

- **Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Umsetzung**
Die Systemleistung der Beleuchtungsanlage zur Erzielung der geforderten Leuchtdichte wird durch die Reflexionseigenschaften der Tunnelwände positiv beeinflusst. Aussagekräftige Größen sind zu dieser Fragestellung sind allerdings bislang nicht veröffentlicht. An dieser Stelle wird deshalb überschlägig von einer Reduzierung der Systemleistung – und damit von der Anzahl der Leuchten – von 5 % ausgegangen. Dementsprechend kann auch die Länge der Verkabelung reduziert werden (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.7).

⁵⁸⁹ vgl. FSV (2013)B, S. 5

- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Reinigung
Durch die verringerte Anzahl an Leuchten, reduziert sich der Aufwand für die Reinigung im entsprechenden Verhältnis. Der Aufwand für die Reinigung ist allerdings so gering, dass eine Veränderung der Leuchtenanzahl kaum Auswirkungen auf die Kosten hat. Auf einen Ansatz wird deshalb verzichtet.
- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Versorgung
Durch die reduzierte Systemleistung verringert sich gleichzeitig auch der Energiebedarf der Leuchten. An dieser Stelle wird davon ausgegangen, dass das Einsparungspotential nicht vollständig durch Reduzierung der Leuchtenanzahl umgesetzt wird. Stattdessen ist ein Puffer vorzuhalten, so dass bei unerwarteten Ereignissen (Abplatzen der Beschichtung o. ä.), die Leuchtdichte dennoch zuverlässig aufgebracht werden kann. Dadurch ist die volle Systemleistung nicht dauerhaft erforderlich, so dass der mittlere Energiebedarf zusätzlich reduziert werden kann. Hierfür wird von einer Einsparung von 5 % ausgegangen (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.8).
- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Wartung
Aus der reduzierten Leuchtenanzahl resultiert eine geringere Menge an zu tauschenden Leuchtmitteln bzw. Vorschaltgeräten (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.9).
- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Instandsetzung
Durch die geringere Anzahl an Leuchten, reduziert sich die Anzahl der Leuchten bzw. Leuchtmittel, die frühzeitig getauscht werden müssen (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.10).
- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Erneuerung:
Wie bei der Umsetzung, resultiert aus der geringeren Systemleistung eine reduzierte Anzahl an Leuchten, die bei der Erneuerung auszutauschen ist (Anhang A.4 – Abs. A.4.3.11).

Bewertung der Vorteilhaftigkeit des Optimierungsansatzes

Durch das Aufbringen einer Beschichtung im Bereich des Tunnelgewölbes kann eine Reduzierung der Lebenszykluskosten des Untersuchungsrahmens erzielt werden. Die Kosten für die betroffenen Module „Gewölbe“ (- 15 %), „Einfahrtsbeleuchtung“ (- 6 %) und „Innenbeleuchtung“ (- 5 %) fallen gegenüber der Ausgangsvariante dabei geringer aus. Allerdings werden diese Einsparungen durch das Aufbringen der Beschichtung, vor allem aber durch die notwendige stetige Erneuerung des Oberflächenschutzsystems zum Großteil wieder aufgehoben. Die Einsparungen bezogen auf die Gesamtkosten selbst fallen mit weniger als 1,0 % letztlich sehr gering aus (Tabelle 10.23). Dabei sind die Erstkosten für die Ausgangsvariante geringer. Mit voranschreitender Nutzungsdauer kehrt sich das Verhältnis um (Abbildung 10.13).⁵⁹⁰

Bei den Ergebnissen der Lebenszykluskostenrechnung ist zu berücksichtigen, dass die Eingangsgrößen z. T. sehr pauschal gewählt wurden und dadurch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Für die gewählten Größen wäre deshalb eine Sensitivitätsanalyse und eine Risikobewertung vorzunehmen um die notwendige Entscheidung besser abzusichern.

⁵⁹⁰ Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass lediglich der begrenzte Untersuchungsumfang mit einem Kalkulationszinssatz von 3,0 % einbezogen wurde.

Tabelle 10.23: Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten
Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung des Gewölbes⁵⁹¹

Bauwerk System Baugruppe Modul	Prozess	LZK Ausgangsvariante	LZK mit Beschichtung	Differenz	Veränderung
Mustertunnel		35.374.781 €	35.042.355 €	-332.426 €	-0,94 %
Baukonstruktion		28.391.740 €	28.314.472 €	-77.268 €	-0,27 %
Innenschale		28.391.740 €	28.314.472 €	-77.268 €	-0,27 %
Gewölbe		15.612.240 €	13.334.399 €	-2.277.841 €	-14,59 %
	Reinigung	262.807 €	148.089 €	-114.718 €	-43,65 %
	Inspektion	801.642 €	600.801 €	-200.841 €	-25,05 %
	Wartung	153.875 €	116.737 €	-37.138 €	-24,14 %
	Instandsetzung	2.255.716 €	330.572 €	-1.925.144 €	-85,35 %
Beschichtung			2.200.573 €	+2.200.573 €	+100,00 %
	Planung	0 €	22.800 €	+22.800 €	+100,00 %
	Umsetzung	0 €	754.300 €	+754.300 €	+100,00 %
	Erneuerung	0 €	1.423.473 €	+1.423.473 €	+100,00 %
Ausstattung		6.983.041 €	6.727.883 €	-255.158 €	-3,65 %
Beleuchtung		4.797.897 €	4.542.739 €	-255.158 €	-5,32 %
Einfahrtsbeleuchtung		2.216.827 €	2.093.191 €	-123.636 €	-5,58 %
	Umsetzung	320.100 €	307.600 €	-12.500 €	-3,91 %
	Versorgung	875.295 €	792.839 €	-82.456 €	-9,42 %
	Wartung	159.728 €	153.990 €	-5.738 €	-3,59 %
	Instandsetzung	100.724 €	98.800 €	-1.924 €	-1,91 %
	Erneuerung	522.068 €	501.050 €	-21.018 €	-4,03 %
Innenbeleuchtung		2.581.070 €	2.449.548 €	-131.522 €	-5,10 %
	Umsetzung	429.200 €	416.100 €	-13.100 €	-3,05 %
	Versorgung	913.355 €	824.553 €	-88.802 €	-9,72 %
	Wartung	205.627 €	198.436 €	-7.191 €	-3,50 %
	Instandsetzung	86.149 €	85.525 €	-624 €	-0,72 %
	Erneuerung	665.988 €	644.183 €	-21.805 €	-3,27 %

⁵⁹¹ Die Aufstellung enthält lediglich die Module und Prozesse, die eine Veränderung gegenüber der Ausgangsvariante erfahren haben. Für die Berechnung der Lebenszykluskosten wurde dabei ein Kalkulationszinssatz von 3,0 % berücksichtigt.

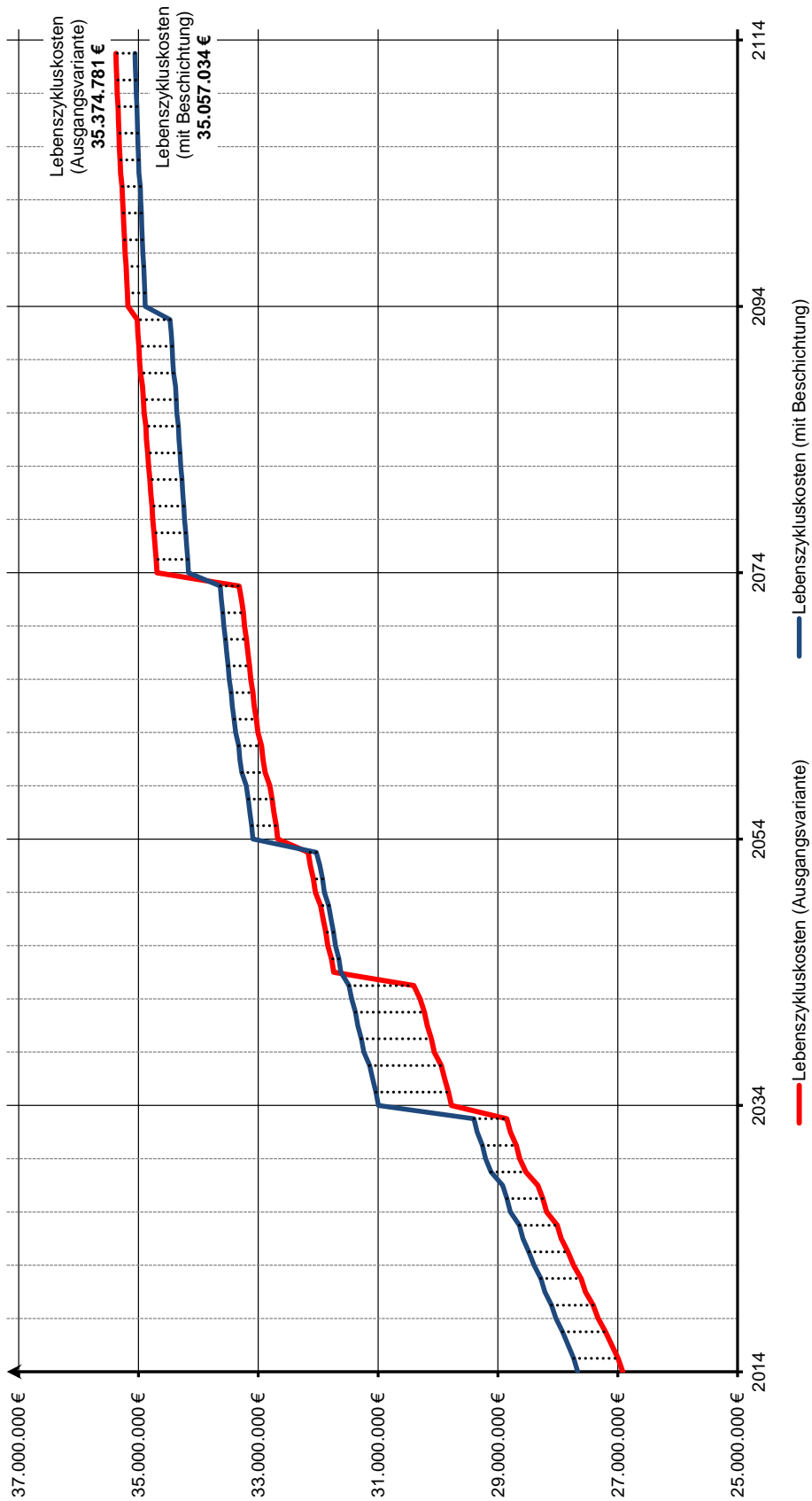





Abbildung 10.13: Gegenüberstellung des Verlaufs der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung⁵⁹²

⁵⁹² Berechnung der Lebenszykluskosten mit einem Kalkulationszinssatz von 3,0 %.

10.2.6 Feststellung der Lebenszykluskosten

Auf Basis der vorliegenden Randbedingungen und der gewählten, deterministischen Kostengrößen zeigt sich, dass eine Erweiterung der ursprünglich geplanten Ausführungsvariante, durch Aufbringen einer Beschichtung auf das Tunnelgewölbe, eine geringfügige Optimierung der Lebenszykluskosten ermöglicht. Demgegenüber lassen sich durch eine zusätzliche jährliche Tunnelreinigung keine Einsparungen nachweisen (Tabelle 10.24).⁵⁹³

Tabelle 10.24: Übersicht der Lebenszykluskosten aller untersuchten Varianten

Variante	Lebenszykluskosten	Veränderung	0 €	10.000.000 €	20.000.000 €	30.000.000 €
Ausgangsvariante	35.374.781 €					
Variante mit zus. Tunnelreinigung	35.384.233 €	+0,03 %				
Variante mit Beschichtung	35.042.355 €	-0,97 %				

Grundsätzlich ist die Höhe der möglichen monetären Einsparungen, unter Berücksichtigung der gewählten Ansätze, mit etwa 1 % sehr begrenzt (Tabelle 10.24). Ebenso sind die Lebenszykluskosten der Variante mit einer zusätzlichen Reinigung mit 0,03 % nahezu identisch mit den Kosten der Ausgangsvariante. Aus den vorangegangenen Berechnungen der Lebenszykluskosten ist somit keine eindeutige Bestimmung der aus ökonomischer Sicht vorteilhaftesten Ausgestaltung möglich. Insbesondere die zum Teil sehr pauschal formulierten, deterministischen Einzelkostengrößen beinhalten große Unsicherheiten, aufgrund dessen eine abgesicherte Entscheidung nicht getroffen werden kann.

Zur Absicherung der Entscheidung hat letztlich eine Berücksichtigung der risikobehafteten Größen zu erfolgen.

10.3 Einbeziehung probabilistischer Größen zur Entscheidungsfindung

Wie die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnungen in Abs. 10.2 zeigen, ist eine Entscheidungsfindung für die aus ökonomischer Sicht vorteilhafteste Ausführungsvariante nicht eindeutig möglich, zumal die abgeschätzten deterministischen Eingangsgrößen zum Teil sehr großen Unsicherheiten unterliegen. Zudem bedingen die Zukunftsbezogenheit der Lebenszykluskostenrechnung und die dabei berücksichtigten Zeiträume (im vorliegenden Beispiel 100 Jahre) Unsicherheiten in den prognostizierten Werten.

Zur Unterstützung der Entscheidungsfindung ist eine Risikoanalyse vorzunehmen. Sie dient dazu, vorhandene Unsicherheiten in den Entscheidungsprozess einzubeziehen und die Risiken und Chancen eines Projektes zu quantifizieren. Hierfür ist auf die in Abs. 8 vorgestellte Modell- und Methodenerweiterung zurückzugreifen und die relevanten Attribute mit möglichen Wertausprägungen und Eintrittswahrscheinlichkeiten abzubilden. Die daraus resultierenden Lebenszykluskosten der einzelnen Varianten sind mit Hilfe einer Risikoanalyse zu bestimmen und zur Entscheidungsfindung gegenüberzustellen.

Die Durchführung der Risikoanalyse wird auf die Ausführungsvariante und die Variante mit Beschichtung beschränkt.⁵⁹⁴

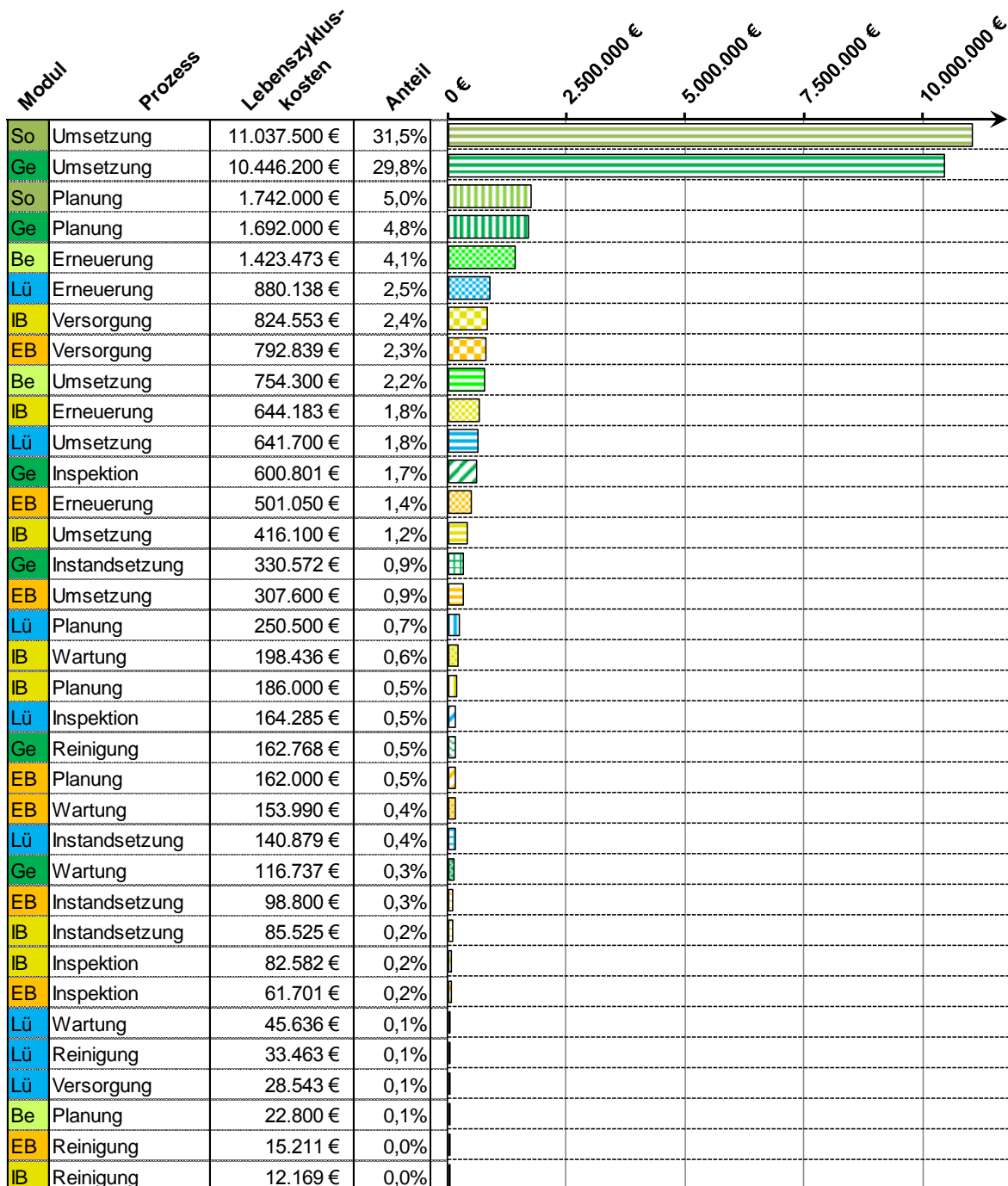
⁵⁹³ Die Ergebnisse beziehen sich jeweils auf einen Kalkulationszinssatz von 3,0 %.

⁵⁹⁴ Für die weiteren Berechnungen wird auf einen Kalkulationszinssatz von 3,0 % abgestellt.

10.3.1 Sensitivitätsanalyse

Zur Eingrenzung der Datenerhebung für die Abbildung probabilistischer Eingangsgrößen sind im Vorfeld die die Lebenszykluskosten maßgeblich bestimmenden Parameter zu identifizieren. Hierzu wird im ersten Schritt, auf Basis der in Abs. 10.2 erfolgten deterministischen Projektuntersuchung, eine Rangfolgenbildung der einzelnen Kostenbestandteile vorgenommen (Tabelle 10.25).

Tabelle 10.25: Rangfolgenbildung zur Identifikation der Kostentreiber⁵⁹⁵



Ge = Gewölbe | So = Sohle | EB = Einfahrtsbeleuchtung | IB = Innenbeleuchtung | Lü = Lüftung

⁵⁹⁵ Zur Eingrenzung der Darstellung sind nur die Prozesse aufgeführt, für die Kosten anfallen. Die Tabelle umfasst dabei die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnung für die Variante mit Beschichtung. Der Ergebnisse beruhen auf einer Lebenszykluskostenrechnung mit einem Kalkulationszinssatz von 3,0 %.

Zur weiteren Eingrenzung der Risiken bzw. Parameter werden Sensitivitätsanalysen für die Parameter durchgeführt, die die Lebenszykluskosten wesentlich bestimmen. Beispielfähig sind in Abbildung 10.14 die wesentlichen Einflussgrößen (in absteigender Relevanz) für die Variante mit Beschichtung in einem Tornadodiagramm aufgeführt. Auf eine Darstellung aller Einflussgrößen wird aus Platzgründen an dieser Stelle verzichtet.

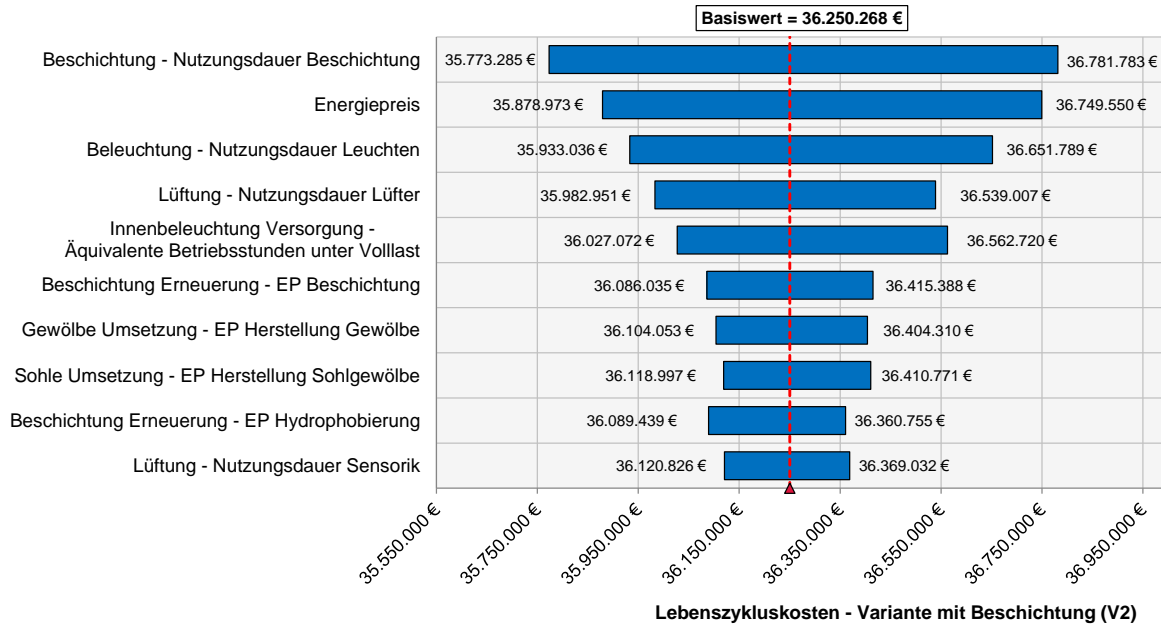


Abbildung 10.14: Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der maßgeblichen Einflussgrößen für die Variante mit Beschichtung⁵⁹⁶

10.3.2 Evaluation der probabilistischen Eingangsgrößen

Die Anwendung der Risikoanalyse erfordert die Abbildung der unsicheren Eingangsgrößen. Ausgehend von den unter Abs. 10.3.1 vorgenommenen Auswertungen zur Bestimmung der wesentlichen Einflussgrößen, sind hierzu die Verteilungsfunktionen sowie die möglichen Werteausprägungen der einzelnen Größen zu bestimmen. Ebenso sind vorhandene Korrelationen zwischen unsicheren Größen zu erheben und in die Risikoanalyse für die Lebenszykluskostenrechnung einzubinden.

Die Erhebung der Daten ist der wesentliche Schritt für eine realitätsnahe Abbildung der dem Projekt immanenten Chancen und Risiken. Die Bestimmung kann beispielsweise durch Auswertung von Daten bereits in Betrieb befindlicher Bauwerke erfolgen.⁵⁹⁷ Aufgrund bislang nur unzureichend veröffentlichter Werte und in Ermangelung realer Daten kann ein vergleichbares Vorgehen an dieser Stelle nicht erfolgen. Stattdessen werden für die einzelnen Größen eigenständige Abschätzungen vorgenommen, um die Funktionalität der entwickelten Methodik aufzuzeigen.⁵⁹⁸

Nachfolgend ist an konkreten Eingangsgrößen, die Definition der notwendigen probabilistischen Attribute beispielhaft dargestellt. Auf eine vollumfängliche Abbildung aller als unsicher eingestuftener Eingangsgrößen wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

⁵⁹⁶ Die Ergebnisse basieren auf einer Lebenszykluskostenrechnung mit einem Kalkulationszinssatz von 3,0 %.

⁵⁹⁷ Weitere Ansätze zur Bestimmung der probabilistischen Eingangsgrößen wurden in Abs. 3.2.7 bzw. Anhang A.1 – Abs. A.1.5 vorgestellt.

⁵⁹⁸ Für die Abschätzung der Wahrscheinlichkeitsverteilung wird auf die in Abs. A.1.2 herausgearbeiteten Verteilungsfunktionen und deren Anwendungsspektren zurückgegriffen.

Nutzungsdauer Lüfter

Zur Abbildung des Ausfallverhaltens von Lüftern als elektromechanische Bauteile wird in der Literatur die Weibullverteilung vorgeschlagen.⁵⁹⁹ Die programmtechnische Erfassung in der Lebenszykluskostenrechnung erlaubt jedoch nur den Ansatz von natürlichen Zahlen. Das bedeutet, dass lediglich diskrete Wahrscheinlichkeitsfunktion eingebunden werden können. Durch Anwendung der Binomialverteilung wird dieser Anforderung Rechnung getragen und das Ausfallverhalten – angelehnt an die Weibullverteilung – modelliert. Als Erwartungswert wird dabei von der in der Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegebenen Nutzungsdauer von 20 Jahren ausgegangen.⁶⁰⁰ Der Faktor der Erfolgswahrscheinlichkeit wird mit 0,75 angesetzt (Tabelle 10.26).

Nutzungsdauer Beschichtung

Über die Nutzungsdauer der Beschichtung liegen unterschiedliche Aussagen vor. So reichen die in der Literatur veröffentlichten Werte von 10 Jahren bis über 30 Jahre.⁶⁰¹ Als Grenzwerte wird an dieser Stelle eine Nutzungsdauer von mindestens 15 Jahren und längstens 25 Jahren angesetzt. Da bislang keine Aussagen über eine Eintrittswahrscheinlichkeit vorliegen, wird vereinfacht von einer gleichmäßigen Verteilung – in Form einer diskreten Verteilungsfunktion – ausgegangen (Tabelle 10.26).

Einsparung Dauer Reinigung Gewölbe

In den deterministischen Berechnungen wurden die Einsparungen für die Dauern der einzelnen Tätigkeiten bei der Tunnelreinigung mit 40 % abgeschätzt (Abs. 10.2.5.2). Zur Berücksichtigung, dass die zeitlichen Einsparungen deutlich geringer ausfallen wird eine untere Grenze von 10 % abgeschätzt. Als oberer Grenzwert wird eine maximale Einsparung von 50 % angesetzt. Eine eindeutige Bestimmung der Verteilungsfunktion kann nicht vorgenommen werden. Da davon auszugehen ist, dass die Beschichtung durchaus eine deutliche zeitliche Einsparung (Ansatz 40 %) bedingt, wird hierfür eine Dreiecksverteilung berücksichtigt (Tabelle 10.26).

Einheitspreis (EP) Betonabtrag

Der Einheitspreis für den Betonabtrag bei der Instandsetzung des Gewölbes wurde aus der Veröffentlichung von GÜNTER entnommen und dem Preisniveau des Jahres 2014 angeglichen. Die Vielzahl an Einflussgrößen, die den Einheitspreis bestimmen (Fläche, Betongüte, Arbeitsweise, Konjunktur usw.), bedingen allerdings die Berücksichtigung von Abweichungen. Ausgehend vom zentralen Grenzwertsatz der Stochastik ist darauf zu schließen, dass sich die Verteilungsfunktion, bedingt durch die Anzahl an probabilistischen Eingangsgrößen, einer Normalverteilung annähert.⁶⁰² Als Erwartungswert dient der bisherige Einheitspreis von 19,20 €/m². Als Standardabweichung wird von 5 % ausgegangen (Tabelle 10.26).

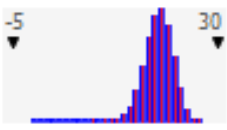
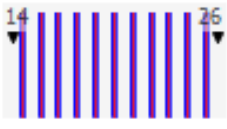
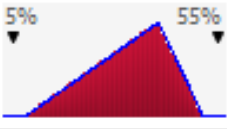
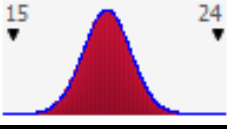
⁵⁹⁹ vgl. BERTSCHE, LECHNER (2004), S. 41 ff.; THEWES, VOGT (2014), S. 424 – siehe auch Abs. A.1.2.2

⁶⁰⁰ vgl. FSV (2014)c, S. 10

⁶⁰¹ vgl. RAUPACH, ORLOWSKY (2008), S. 205; LOHAUS ET AL. (2011), S. 479

⁶⁰² vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 89 – siehe auch Abs. A.1.2.2 (Normalverteilung)

Tabelle 10.26: Beispielhafte Verteilungsfunktionen unsicherer Eingangsgrößen

Name	Diagramm	Min.	Mittelwert	Max.
Lüftung Nutzungsdauer Lüfter		9 Jahre	19 Jahre	25 Jahre
Beschichtung Nutzungsdauer Beschichtung		15 Jahre	20 Jahre	25 Jahre
Gewölbe Reinigung - Beschichtung Einsparung Reinigung		10%	33%	50%
Gewölbe Instandsetzung EP Betonabtrag HDW		15,34 €/m ²	19,20 €/m ²	23,02 €/m ²

Korrelationen

Vorhandene und bereits identifizierte Korrelationen, beispielsweise zwischen der Vorhaltedauer für die Baustelleneinrichtung von Sohle und Gewölbe, werden in der Risikoanalyse berücksichtigt. Zusätzlich werden Werte, die für beide Untersuchungsvarianten gelten, in der Form gekoppelt, dass für jeden Rechendurchlauf identische Werte Berücksichtigung finden.

10.3.3 Bestimmung der Lebenszykluskosten mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation

Die Berechnung der Lebenszykluskosten – auf Basis unsicherer Eingangsgrößen – erfolgt mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation (MCS). Zur Anwendung kommt das Risikoanalyse-tool @RISK in der Version 6 als Add-In für die Tabellenkalkulationssoftware Microsoft-EXCEL[®].⁶⁰³ Die Ausgangsbasis für die Simulation bilden die bisher entwickelten Tabellen und Berechnungsroutinen aus der deterministischen Lebenszykluskostenrechnung.

Zur Gewährleistung einer ausreichend stabilen Zielgröße werden für die Monte-Carlo-Simulation 10.000 Iterationsschritte durchgeführt.

Ergebnisse der Risikoanalyse

Die Ergebnisse der probabilistischen Lebenszykluskostenrechnung der Ausgangsvariante (V0) und der Variante mit Beschichtung (V2) sind in Tabelle 10.27 zusammengefasst. Dabei handelt es sich um die Gesamtkosten der jeweiligen Variante für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren. Die zugehörigen Verteilungsfunktionen der beiden Varianten sind Abbildung 10.17 zu entnehmen.

Der Verlauf der Lebenszykluskosten über den Betrachtungszeitraum – inkl. der Grenzwerte (min. und max.) – ist für beide Varianten in Abbildung 10.16 dargestellt.

⁶⁰³ Das Programm @RISK 6 ist Bestandteil der „DecisionTools Suite 6.2“ der Firma PALISADE.

Tabelle 10.27: Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse der Risikoanalyse

Statistiken	Ausgangsvariante (V0)	Variante mit Beschichtung (V2)
Minimum	34.254.050 €	34.303.484 €
Maximum	38.355.201 €	38.876.977 €
Mittelwert	35.981.547 €	36.164.288 €
Std.Abw.	554.864 €	639.602 €
Varianz	3,07874E+11	4,0909E+11
Schiefe	0,199605649	0,212241645
Wölbung	2,967407288	2,750037959
Medianwert	35.965.752 €	36.131.559 €
Modus	35.985.327 €	35.991.008 €
Linker X-Wert	35.105.890 €	35.159.809 €
Linker P-Wert	5%	5%
Rechter X-Wert	36.926.585 €	37.245.834 €
Rechter P-Wert	95%	95%

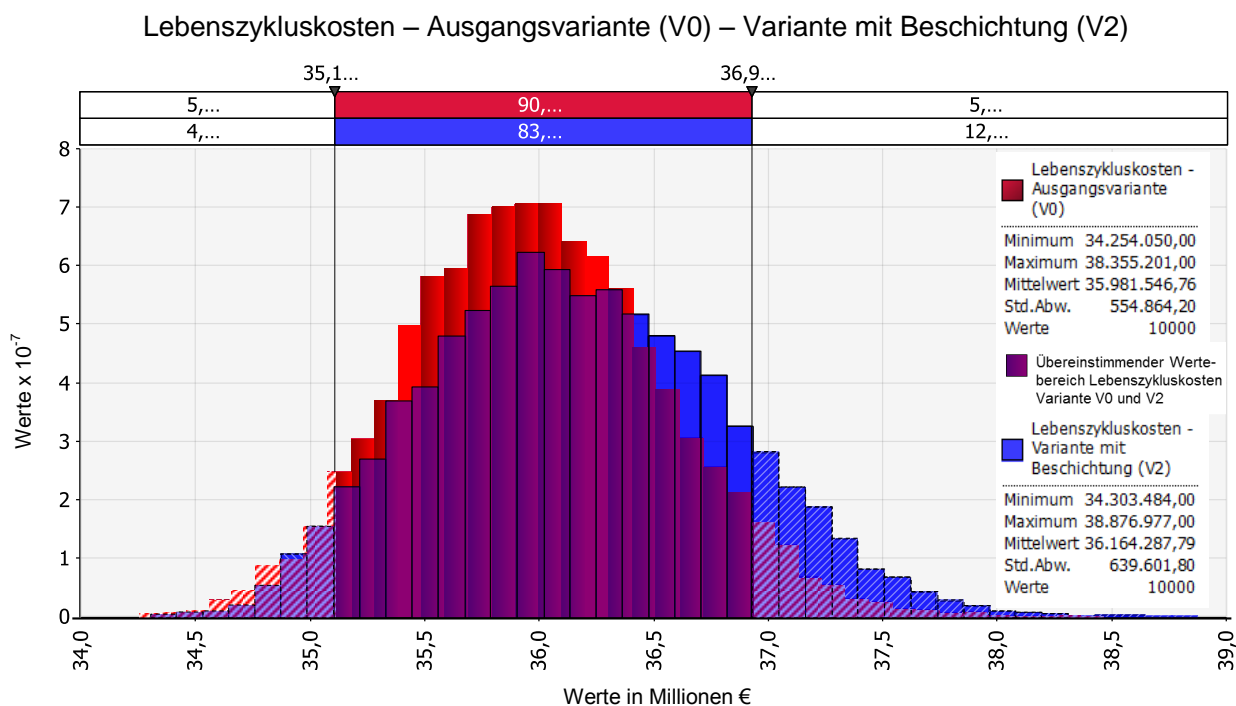


Abbildung 10.15: Gegenüberstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der Lebenszykluskosten von Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung

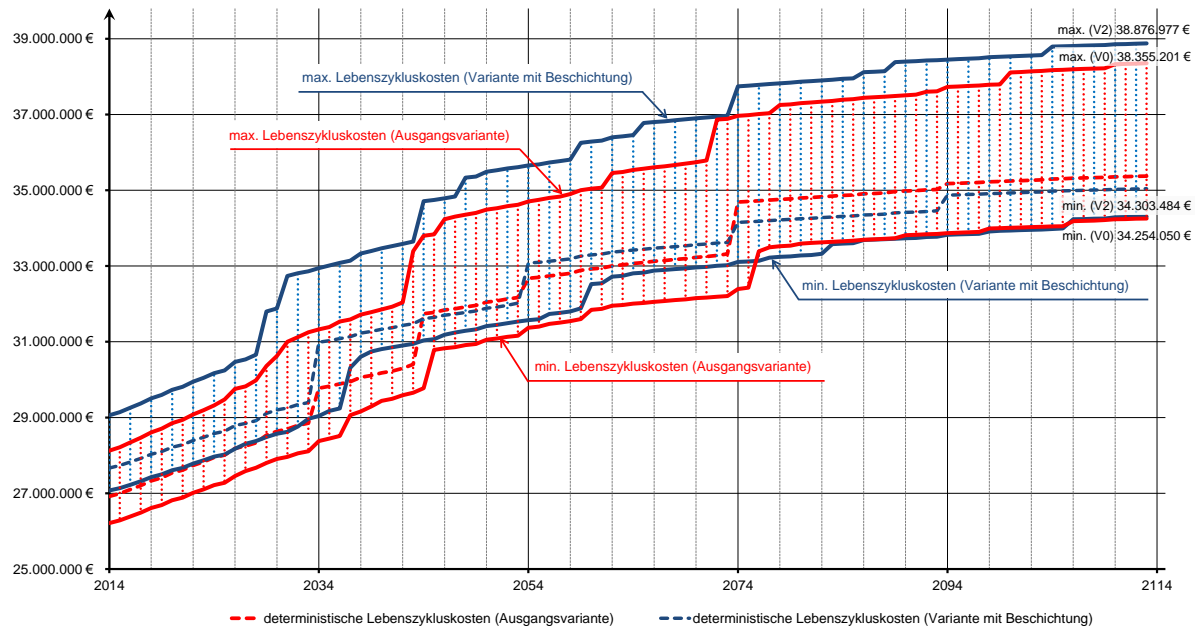


Abbildung 10.16: Grenzwertverläufe (min. und max.) der Lebenszykluskosten für die Ausgangsvariante und die Variante mit Beschichtung

10.3.4 Bewertung der Ergebnisse der Risikoanalyse

Die aus der Risikoanalyse in Abs. 10.3.3 resultierenden Ergebnisse geben die Bandbreite der möglichen Ergebnisausprägungen für die Lebenszykluskosten der beiden Varianten wieder. Diese nicht eindeutigen, wahrscheinlichkeitsbasierenden Ergebnisse bedürfen einer eigenständigen Bewertung zur Feststellung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit. Mit Hilfe der aus der Risikoanalyse bestimmten Risikokenngrößen (Risikomaße) und unter Einbeziehung der Risikobereitschaft der Entscheidungsträger hat eine Identifikation der vorteilhaftesten Variante zu erfolgen. In Tabelle 10.28 sind alle relevanten Ergebnisse zur Bewertung der Lebenszykluskosten zusammengefasst.

Tabelle 10.28: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Risikoanalyse

Statistiken	Ausgangsvariante	Variante mit Beschichtung	Unterschied
Minimum	34.254.050 €	34.303.484 €	+0,14 %
Maximum	38.355.201 €	38.876.977 €	+1,34 %
Mittelwert	35.981.547 €	36.164.288 €	+0,51 %
Std.Abw.	554.864 €	639.602 €	+13,25 %
Varianz	3,07874E+11	4,0909E+11	+24,74 %
Schiefe	0,199605649	0,212241645	+5,95 %
Medianwert	35.965.752 €	36.131.559 €	+0,46 %
Modus	35.985.327 €	35.991.008 €	+0,02 %
Linker X-Wert	35.105.890 €	35.159.809 €	+0,15 %

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der Risikoanalyse zeigt, dass der Mittelwert (auch Erwartungswert) der Lebenszykluskosten für die Ausgangsvariante gegenüber dem Mittelwert der Variante mit Beschichtung nur marginal geringer ausfällt ($\Delta = 0,5\%$). Im Gegensatz dazu differieren die Werte der Standardabweichung und der Varianz – beides Maßzahlen für die Abweichung vom Erwartungswert (Streubreite) – mit 13 % bzw. 25 % sehr deutlich (Abbildung 10.17).

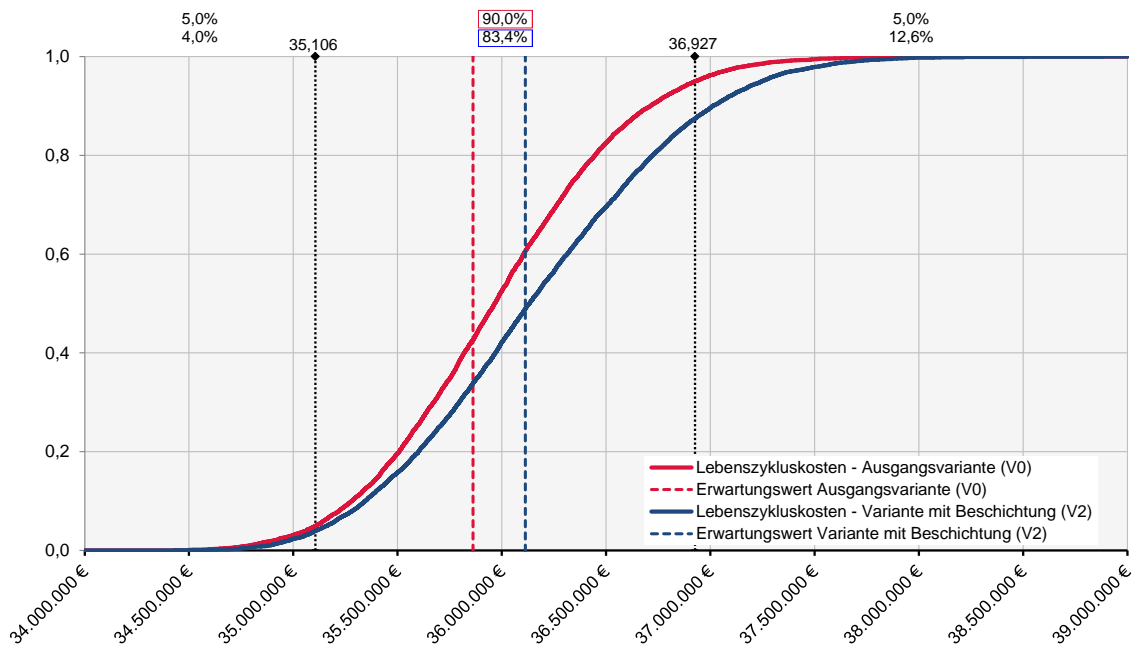


Abbildung 10.17: Gegenüberstellung der Verteilungsfunktion der Lebenszykluskosten Ausgangsvariante und Variante mit Beschichtung

Im Ergebnis ist die Eintrittswahrscheinlichkeit für den Erwartungswert der Ausgangsvariante gegenüber der Vergleichsvariante größer. Zusätzlich liegen sowohl die minimal als auch die maximal möglichen Lebenszykluskosten unterhalb der Alternativvariante. Daraus ist zu folgern, dass selbst bei einer Betrachtung durch risikoafine Entscheidungsträger, die Ausgangsvariante eine ökonomische Vorteilhaftigkeit gegenüber der Variante mit Beschichtung aufweist.

Insbesondere in der bislang nicht eindeutig prognostizierbaren Nutzungsdauer sowie den kaum verifizierten Kosten für die Herstellung bzw. Erneuerung der Beschichtung ist die Hauptursache zu suchen, warum sich eine Wandlung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit gegenüber der deterministischen Lebenszykluskostenrechnung eingestellt hat.

Für die weiteren Planungen des Tunnelbauwerkes bedeutet dies, dass unter Einbeziehung der Eintrittswahrscheinlichkeiten – abweichend zum Ergebnis der deterministischen Berechnung – die Ausgestaltung des Tunnelbauwerkes auf Basis der Ausgangsvariante vorzunehmen ist.

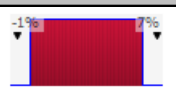


Die Risikoanalyse lässt ebenfalls den Schluss zu, dass, sofern die Lebensdauer der Beschichtung mit mindestens 20 Jahren garantiert werden kann, die Variante mit Beschichtung aus ökonomischer Sicht vorteilhafter ist. Letztlich wäre das Bauwerk dann mit einer zusätzlichen Beschichtung zu planen und umzusetzen.

10.3.5 Abschätzung der Relevanz von finanzwirtschaftlichen Eingangsgrößen

Zur Abschätzung der Einflüsse aus Veränderungen des Kalkulationszinssatzes, der allgemeinen Preissteigerung sowie der Steigerung des Energiepreises als finanzwirtschaftliche Eingangsgrößen, wird nachfolgend eine zusätzliche Risikoanalyse vorgenommen. Als Ausgangsbasis dient die als ökonomisch vorteilhaft identifizierte Ausgangsvariante.

Für die Durchführung der Risikoanalyse sind im ersten Schritt, die möglichen Werteausprägungen und die Verteilungsfunktion für die Eingangsgrößen zu definieren. An dieser Stelle soll dabei lediglich die Sensitivität der Lebenszykluskosten festgestellt werden. Aus diesem Grund kann vereinfacht von einer Gleichverteilung ausgegangen werden. Die oberen und unteren Grenzen werden pauschal festgelegt (Tabelle 10.29).

Tabelle 10.29: Verteilungsfunktionen der veränderlichen Eingangsgrößen

Name	Diagramm	Min.	Mittelwert	Max.
Kalkulationszinssatz		0,0 %	3,0 %	6,0 %
Preissteigerung Energie		0,0 %	1,5 %	3,0 %
Preissteigerung allgemein		-3,0 %	0,0 %	3,0 %

Ergebnis:

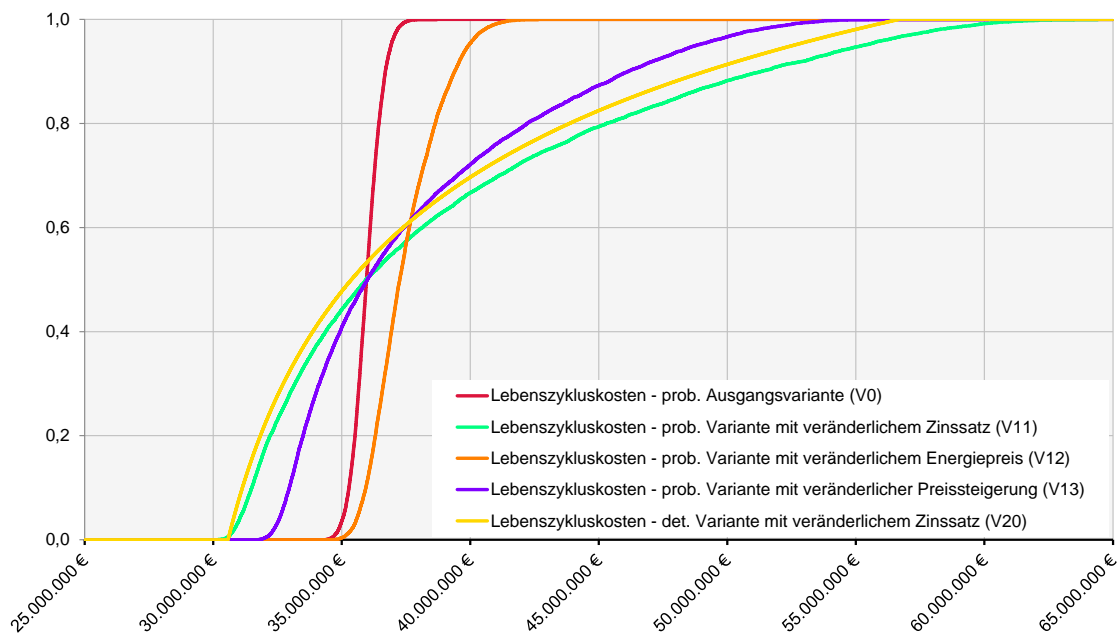


Abbildung 10.18: Gegenüberstellung der Verteilungsfunktion der Lebenszykluskosten

Den in Abbildung 10.18 dargestellten Verteilungsfunktionen ist zu entnehmen, dass eine Veränderung des Kalkulationszinssatzes, eine Steigerung der Energiepreise oder eine allgemeine Preissteigerung sehr deutlichen Einfluss auf die Lebenszykluskosten hat. Die Steigung der Verteilungsfunktion der Ausgangsvariante verläuft deutlich steiler, als die Funktionen der weiteren Varianten. Daraus ist abzuleiten, dass die Abweichungen vom Erwartungswert für die Ausgangsvariante vergleichsweise gering ausfallen. Dies deckt

sich mit den in Tabelle 10.30 aufgeführten Risikomaßzahlen für die einzelnen Varianten. Aus den Ergebnisgrößen ist zu erkennen, dass die in der Ausgangsvariante berücksichtigten Unsicherheiten der Attribute (Kosten und Zeit) im Vergleich zum Risikopotential der finanzmathematischen Eingangsgrößen kaum eine Relevanz aufweisen. So ist insbesondere die Bandbreite der möglichen Ergebnisse der Vergleichsvarianten, ausgedrückt durch die Varianz und Standardabweichung, deutlich größer als die Grenzwerte der Ausgangsvariante. Das bedeutet, dass die in den Attributen enthaltenen Unsicherheiten, von den Unsicherheiten der finanzmathematischen Eingangsgrößen vollständig überlagert werden.

Tabelle 10.30: Ergebnisse der Risikoanalyse hinsichtlich finanzmathematischer Größen

Statistiken	Ausgangsvariante	veränderlicher Kalkulationszinssatz	veränderliche Energiepreissteigerung	veränderliche Preissteigerung	det. mit veränderl. Kalkulationszinssatz
Minimum	34.224.125 €	30.059.833 €	34.251.229 €	31.509.775 €	30.576.863 €
Maximum	38.119.431 €	64.720.052 €	42.161.029 €	57.049.341 €	56.640.687 €
Mittelwert	35.981.023 €	38.782.417 €	37.475.397 €	37.858.072 €	37.828.700 €
Std.Abw.	553.069 €	7.670.001 €	1.332.309 €	5.160.924 €	6.873.018 €
Varianz	3,05885E+11	5,88289E+13	1,77505E+12	2,66351E+13	4,72384E+13
Schiefe	0,180731861	1,090232156	0,583128319	1,100141931	1,021564589
Wölbung	2,888313882	3,226849341	2,824350191	3,308504101	2,996753356
Medianwert	35.968.365 €	35.971.925 €	37.259.370 €	35.982.233 €	35.373.906 €
Modus	36.187.430 €	31.824.417 €	36.372.262 €	32.986.083 €	30.601.771 €

Mit dem Ergebnis dieser zusätzlichen Untersuchung wurde noch einmal verdeutlicht, wie wesentlich die Wahl der finanzmathematischen Eingangsgrößen für die Ausprägung der Lebenszykluskosten ist. Letztlich sind die Einflüsse von solcher Relevanz, dass bei einer unsachgemäßen Festlegung, eine Einbeziehung von Unsicherheiten für die Attribute der einzelnen Module als obsolet erscheint. Dies gilt besonders für die Wahl des Kalkulationszinssatzes, da hierdurch zusätzlich die Möglichkeit eröffnet wird, die Lebenszykluskosten so zu beeinflussen, dass nicht zwingend die aus Sicht der (ökonomischen) Nachhaltigkeit zu bevorzugende Variante favorisiert und umgesetzt wird.

10.4 Umsetzung der kontinuierlichen Optimierung

Die Anwendung der Lebenszykluskostenrechnung beschränkt sich auf nur wenige Zeitpunkte im Lebenszyklus, bei denen Entscheidung über signifikante Investitionen anstehen. Eine kontinuierliche Optimierung des Bauwerkes oder auch nur einzelner Prozesse des Betreibers wird dabei aber nicht angestrebt. Zur Umsetzung dieser dauerhaften Verbesserung wurde in Abs. 9 ein Lösungsansatz, basierend auf dem Benchmarking-Konzept, vorgestellt.

Nachfolgend wird eine Verifizierung des Modells zur kontinuierlichen Optimierung am Beispiel des bereits vorgestellten Mustertunnels vorgenommen. Dazu wird der Betrachtungszeitpunkt fiktiv auf das Jahr 2021 gelegt. Der Mustertunnel wäre somit bereits sechs Jahre in Betrieb. Bei den erhobenen Daten handelt es sich, wie bereits zur Verifizierung des Modularen Prozessmodells, um fiktive, möglichst realitätsnahe Daten. Entsprechendes gilt auch für die Daten des Tunnels, der als Vergleichsbauwerk dienen soll.

10.4.1 Analysegegenstand

Die Untersuchungen zur Identifizierung von Optimierungsansätzen in der Nutzungsphase können grundsätzlich für alle Module und den darin implementierten Prozessen eines Tunnelbauwerkes erfolgen. Für die angestrebte Verifizierung wird der Analysegegenstand auf folgende Elemente beschränkt:

- Modul Gewölbe – Prozess Reinigung
- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Reinigung
- Modul Einfahrtsbeleuchtung – Prozess Versorgung
- Modul Innenbeleuchtung – Prozess Reinigung
- Modul Innenbeleuchtung – Prozess Versorgung

Als Vergleichsgegenstand für das Benchmarking dient ein Tunnelbauwerk eines externen, unabhängigen Betreibers. Für das daraus resultierende externe Benchmarking werden primäre Daten als Vergleichsgrößen erhoben. Dazu sind vorgelagert die Randbedingungen der beiden Untersuchungsgegenstände zu erheben. Zur Eingrenzung der wesentlichen Kriterien für die einzelnen Prozesse kann auf die für das Modulare Prozessmodell erhobenen Schnittstellen aus Abs. 10.2.2 zurückgegriffen werden.

Tabelle 10.31: Gegenüberstellung Parameter Mustertunnel - Vergleichstunnel

Parameter	Mustertunnel	Vergleichstunnel
Tunnellänge	2.400 m	1.500 m
Tunnelquerschnitt	Gewölbequerschnitt	Gewölbequerschnitt
Querschnittsbreite / -höhe	6,50 m / 9,20 m	6,30 m / 9,50 m
Längsneigung	± 2,0 %	± 1,0 %
Betriebsart	Richtungsverkehr	Richtungsverkehr
Anzahl der Tunnelröhren	2	2
Fahrspuren je Fahrtrichtung	2	2
Verkehrsfreigabe	01.11.2014	14.09.2008
DTV ⁶⁰⁴	14.000 Kfz/24h (2014)	13.900 Kfz/24h (2014)
Straßenart	Bundesstraße	Bundesstraße
zul. Höchstgeschwindigkeit	100 km/h	80 km/h
Gefährdungsklasse	II	II
zu reinigende Wandhöhe	3,00 m	3,00 m
Reinigungsart (Wände)	mechanisch (Bürsten)	mechanisch (Bürsten)
Beleuchtung	Natriumdampf-Hochdrucklampen	Natriumdampf-Hochdrucklampen
Leuchtenanordnung	zweireihig (Einfahrt) einreihig (Innen)	zweireihig (Einfahrt) einreihig (Innen)
Leuchtschaltung	Stufenschaltung	Stufenschaltung
Leuchtdichte Annäherung (max.)	3.570 cd/m ²	3.490 cd/m ²
Leuchtdichte Einfahrt (max.)	178,5 cd/m ²	136,8 cd/m ²
Leuchtdichte Innen (max.)	3,3 cd/m ²	3,3 cd/m ²
Fahrbahnbelag	Betonfahrbahn	Betonfahrbahn
Tunnelwände	Sichtbeton	Sichtbeton

⁶⁰⁴ DTV – Durchschnittlich tägliche Verkehrsstärke

10.4.2 Datenerhebung

Die Daten werden als primäre Daten von dem jeweiligen Betreiber erhoben.⁶⁰⁵ Dazu wird zwischen interner (Betreiber Mustertunnel) und externer Datenerhebung (Betreiber Vergleichstunnel) differenziert. Für beide Bauwerke kann auf die Dokumentationen der einzelnen Betriebsjahre seit der jeweiligen Inbetriebnahme zurückgegriffen werden. Es werden dabei nur Daten übernommen, die ein volles Betriebsjahr abbilden. Das Jahr der Inbetriebnahme bleibt somit bei beiden Tunneln außen vor.

Zur Datenerhebung kann grundsätzlich auf das Modulare Prozessmodell zurückgegriffen werden. Aufgrund des eingeschränkten Analysegegenstandes erfolgt eine vereinfachte Darstellung in Tabelle 10.32 bis Tabelle 10.37. Für die Reinigungskosten (Tunnelwände und Beleuchtung) wurden die Dauer der Reinigungsarbeiten, der mittlere Stundenlohn sowie die für die Leistung angefallenen Kosten erhoben (Tabelle 10.32 bzw. Tabelle 10.35). Die Kosten für die Energieversorgung der Beleuchtung basieren auf gemessenen Energieverbräuchen und dem zugehörigen Energiepreis (Tabelle 10.33 und Tabelle 10.34 bzw. Tabelle 10.36 und Tabelle 10.37).

Interne Datenerhebung

Tabelle 10.32: Datenerhebung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Mustertunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten
2015	11,0 h	45,00 €/h	6.102,40 €
2016	11,5 h	45,00 €/h	6.236,40 €
2017	19,5 h	47,00 €/h	8.574,40 €
2018	10,5 h	47,00 €/h	6.090,40 €
2019	12,0 h	49,00 €/h	6.638,40 €
2020	11,5 h	50,00 €/h	6.561,40 €

Tabelle 10.33: Datenerhebung Versorgung Beleuchtung Mustertunnel

Jahr	Einfahrtsbeleuchtung			Innenbeleuchtung		
	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten
2015	236.826 kWh	0,110 €/kWh	26.050,84 €	239.886 kWh	0,110 €/kWh	26.387,48 €
2016	246.011 kWh	0,110 €/kWh	27.061,20 €	259.941 kWh	0,110 €/kWh	28.593,51 €
2017	256.189 kWh	0,110 €/kWh	28.180,78 €	249.142 kWh	0,110 €/kWh	27.405,65 €
2018	246.507 kWh	0,106 €/kWh	26.129,78 €	238.858 kWh	0,106 €/kWh	25.318,92 €
2019	235.585 kWh	0,106 €/kWh	24.971,96 €	258.141 kWh	0,106 €/kWh	27.362,97 €
2020	245.018 kWh	0,106 €/kWh	25.971,90 €	246.828 kWh	0,106 €/kWh	26.163,80 €

Tabelle 10.34: Datenerhebung Reinigung Beleuchtung Mustertunnel

Jahr	Einfahrtsbeleuchtung			Innenbeleuchtung		
	Dauer	Mittellohn	Kosten	Dauer	Mittellohn	Kosten
2015	4,0 h	45,00 €/h	930,00 €	3,2 h	45,00 €/h	754,00 €
2016	3,1 h	45,00 €/h	732,00 €	2,4 h	45,00 €/h	578,00 €
2017	3,2 h	47,00 €/h	773,20 €	2,1 h	47,00 €/h	524,60 €
2018	3,1 h	47,00 €/h	750,60 €	2,3 h	47,00 €/h	569,80 €
2019	3,0 h	49,00 €/h	746,00 €	2,6 h	49,00 €/h	653,20 €
2020	2,9 h	50,00 €/h	731,50 €	2,5 h	50,00 €/h	637,50 €

⁶⁰⁵ Bei den hier erhobenen Daten handelt es sich um realitätsnahe Daten.

Externe Datenerhebung

Tabelle 10.35: Datenerhebung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Vergleichstunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten
2009	5,0 h	42,00 €/h	2.755,30 €
2010	4,8 h	42,00 €/h	2.704,10 €
2011	4,0 h	42,00 €/h	2.499,30 €
2012	4,8 h	45,00 €/h	2.806,70 €
2013	4,3 h	45,00 €/h	2.672,70 €
2014	4,8 h	45,00 €/h	2.806,70 €
2015	4,0 h	45,00 €/h	2.592,30 €
2016	4,8 h	46,00 €/h	2.840,90 €
2017	5,3 h	46,00 €/h	2.976,90 €
2018	4,5 h	49,00 €/h	2.858,30 €
2019	4,5 h	49,00 €/h	2.858,30 €
2020	4,0 h	49,00 €/h	2.716,30 €

Tabelle 10.36: Datenerhebung Versorgung Beleuchtung Vergleichstunnel

Jahr	Einfahrtsbeleuchtung			Innenbeleuchtung		
	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten
2009	145.610 kWh	0,107 €/kWh	15.580,24 €	141.823 kWh	0,107 €/kWh	15.175,01 €
2010	153.605 kWh	0,107 €/kWh	16.435,76 €	153.667 kWh	0,107 €/kWh	16.442,34 €
2011	158.679 kWh	0,114 €/kWh	18.089,44 €	147.206 kWh	0,114 €/kWh	16.781,51 €
2012	152.375 kWh	0,114 €/kWh	17.370,77 €	143.053 kWh	0,114 €/kWh	16.308,05 €
2013	144.380 kWh	0,114 €/kWh	16.459,28 €	155.513 kWh	0,114 €/kWh	17.728,43 €
2014	192.814 kWh	0,110 €/kWh	21.209,51 €	116.288 kWh	0,110 €/kWh	12.791,71 €
2015	159.602 kWh	0,110 €/kWh	17.556,20 €	142.592 kWh	0,110 €/kWh	15.685,08 €
2016	151.606 kWh	0,105 €/kWh	15.918,67 €	83.371 kWh	0,105 €/kWh	8.753,93 €
2017	145.302 kWh	0,105 €/kWh	15.256,73 €	147.822 kWh	0,105 €/kWh	15.521,26 €
2018	153.298 kWh	0,105 €/kWh	16.096,26 €	142.284 kWh	0,105 €/kWh	14.939,82 €
2019	158.218 kWh	0,105 €/kWh	16.612,89 €	154.282 kWh	0,105 €/kWh	16.199,61 €
2020	151.914 kWh	0,104 €/kWh	15.799,04 €	147.514 kWh	0,104 €/kWh	15.341,44 €

Tabelle 10.37: Datenerhebung Reinigung Beleuchtung Vergleichstunnel

Jahr	Einfahrtsbeleuchtung			Innenbeleuchtung		
	Dauer	Mittellohn	Kosten	Dauer	Mittellohn	Kosten
2009	2,9 h	42,00 €/h	661,90 €	3,0 h	42,00 €/h	683,00 €
2010	1,9 h	42,00 €/h	450,90 €	1,6 h	42,00 €/h	387,60 €
2012	2,0 h	45,00 €/h	490,00 €	1,4 h	45,00 €/h	358,00 €
2013	2,1 h	45,00 €/h	512,00 €	1,5 h	45,00 €/h	380,00 €
2014	2,2 h	45,00 €/h	534,00 €	1,7 h	45,00 €/h	424,00 €
2015	2,3 h	45,00 €/h	556,00 €	1,2 h	45,00 €/h	314,00 €
2016	2,0 h	46,00 €/h	496,00 €	1,3 h	46,00 €/h	339,90 €
2017	1,6 h	46,00 €/h	406,80 €	1,4 h	46,00 €/h	362,20 €
2018	2,2 h	49,00 €/h	560,40 €	1,5 h	49,00 €/h	398,00 €
2019	1,7 h	49,00 €/h	444,40 €	1,6 h	49,00 €/h	421,20 €
2020	1,8 h	49,00 €/h	467,60 €	1,3 h	49,00 €/h	351,60 €

10.4.3 Datenaufbereitung

Die Durchführung von Benchmarking verlangt eine Vergleichbarkeit der erhobenen Daten und Kennzahlen. Insbesondere zur Vereinheitlichung hinsichtlich des Betrachtungszeitpunktes gilt es die erhobenen Daten aufzubereiten. Hierzu wurde bereits im Vorfeld eine Anpassung an das Betrachtungsjahr 2021 mit der jeweiligen Teuerungsrate vorgenommen. Ebenso wurden Umsatz- bzw. Mehrwertsteuer aus allen Kosten herausgenommen, so dass eine direkte Vergleichbarkeit – auf Basis von Nettogrößen – gegeben ist. Auf weitere Umrechnung kann dadurch verzichtet werden. Konjunkturelle Schwankungen werden an dieser Stelle nicht einbezogen.

Im letzten Schritt der Datenaufbereitung sind die einzelnen Größen auf Plausibilität zu prüfen, so dass Verfälschungen der Vergleichsgrößen auszuschließen sind. Dazu werden vereinfacht die einzelnen Kostengrößen in Relation zum jeweiligen Mittelwert (MW) gesetzt. Sind deutliche Abweichungen ($> \pm 20\%$) zu erkennen, bleibt der Wert des jeweiligen Jahres unberücksichtigt. Aufgrund der besseren Vergleichbarkeit dient für die Energiekosten der Energieverbrauch als Bezugsgröße.

Tabelle 10.38: Datenbereinigung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Mustertunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten	Differenz zum Mittelwert
2015	11,0 h	45,00 €/h	6.102,40 €	-3,5 %
2016	11,5 h	45,00 €/h	6.236,40 €	-1,4 %
2017	19,5 h	47,00 €/h	8.574,40 €	+35,5 %
2018	10,5 h	47,00 €/h	6.090,40 €	-3,7 %
2019	12,0 h	49,00 €/h	6.638,40 €	+4,9 %
2020	11,5 h	50,00 €/h	6.561,40 €	+3,7 %
MW	11,3 h	47,20 €/h	6.325,80 €	

Tabelle 10.39: Datenbereinigung Reinigung Einfahrtsbeleuchtung Mustertunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten	Differenz zum Mittelwert
2015	4,0 h	45,00 €/h	930,00 €	+24,6 %
2016	3,1 h	45,00 €/h	732,00 €	-2,0 %
2017	3,2 h	47,00 €/h	773,20 €	+3,6 %
2018	3,1 h	47,00 €/h	750,60 €	+0,5 %
2019	3,0 h	49,00 €/h	746,00 €	-0,1 %
2020	2,9 h	50,00 €/h	731,50 €	-2,0 %
MW	3,1 h	47,60 €/h	746,66 €	

Tabelle 10.40: Datenbereinigung Reinigung Innenbeleuchtung Mustertunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten	Differenz zum Mittelwert
2015	3,2 h	45,00 €/h	754,00 €	+21,7 %
2016	2,4 h	45,00 €/h	578,00 €	-6,7 %
2017	2,1 h	47,00 €/h	524,60 €	-15,3 %
2018	2,3 h	47,00 €/h	569,80 €	-8,0 %
2019	2,6 h	49,00 €/h	653,20 €	+5,4 %
2020	2,5 h	50,00 €/h	637,50 €	+2,9 %
MW	2,5 h	47,17 €/h	619,52 €	

Tabelle 10.41: Datenbereinigung Energieversorgung Einfahrtsbeleuchtung Mustertunnel

Jahr	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten	Differenz zum Mittelwert
2015	236.826 kWh	0,110 €/kWh	26.050,84 €	-3,1 %
2016	246.011 kWh	0,110 €/kWh	27.061,20 €	+0,7 %
2017	256.189 kWh	0,110 €/kWh	28.180,78 €	+4,8 %
2018	246.507 kWh	0,106 €/kWh	26.129,78 €	+0,9 %
2019	235.585 kWh	0,106 €/kWh	24.971,96 €	-3,6 %
2020	245.018 kWh	0,106 €/kWh	25.971,90 €	+0,3 %
MW	244.356 kWh	0,108 €/kWh	26.394,41 €	

Tabelle 10.42: Datenbereinigung Energieversorgung Innenbeleuchtung Mustertunnel

Jahr	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten	Differenz zum Mittelwert
2015	239.886 kWh	0,110 €/kWh	26.387,48 €	-3,6 %
2016	259.941 kWh	0,110 €/kWh	28.593,51 €	+4,5 %
2017	249.142 kWh	0,110 €/kWh	27.405,65 €	+0,1 %
2018	238.858 kWh	0,106 €/kWh	25.318,92 €	-4,0 %
2019	258.141 kWh	0,106 €/kWh	27.362,97 €	+3,8 %
2020	246.828 kWh	0,106 €/kWh	26.163,80 €	-0,8 %
MW	248.799 kWh	0,108 €/kWh	26.872,06 €	

Tabelle 10.43: Datenbereinigung Reinigung Tunnelwände (bis 3,00 m) Vergleichstunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten	Differenz zum Mittelwert
2009	5,0 h	42,00 €/h	2.755,30 €	-0,1 %
2010	4,8 h	42,00 €/h	2.704,10 €	-1,9 %
2011	4,0 h	42,00 €/h	2.499,30 €	-9,4 %
2012	4,8 h	45,00 €/h	2.806,70 €	+1,8 %
2013	4,3 h	45,00 €/h	2.672,70 €	-3,1 %
2014	4,8 h	45,00 €/h	2.806,70 €	+1,8 %
2015	4,0 h	45,00 €/h	2.592,30 €	-6,0 %
2016	4,8 h	46,00 €/h	2.840,90 €	+3,0 %
2017	5,3 h	46,00 €/h	2.976,90 €	+8,0 %
2018	4,5 h	49,00 €/h	2.858,30 €	+3,7 %
2019	4,5 h	49,00 €/h	2.858,30 €	+3,7 %
2020	4,0 h	49,00 €/h	2.716,30 €	-1,5 %
MW	4,6 h	45,42 €/h	2.757,32 €	

Tabelle 10.44: Datenbereinigung Reinigung Einfahrtsbeleuchtung Vergleichstunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten	Differenz zum Mittelwert
2009	2,9 h	42,00 €/h	661,90 €	+34,6 %
2010	1,9 h	42,00 €/h	450,90 €	-8,3 %
2011	-	-	-	-100,0 %
2012	2,0 h	45,00 €/h	490,00 €	-0,4 %
2013	2,1 h	45,00 €/h	512,00 €	+4,1 %
2014	2,2 h	45,00 €/h	534,00 €	+8,6 %
2015	2,3 h	45,00 €/h	556,00 €	+13,1 %
2016	2,0 h	46,00 €/h	496,00 €	+0,9 %
2017	1,6 h	46,00 €/h	406,80 €	-17,3 %
2018	2,2 h	49,00 €/h	560,40 €	+13,9 %
2019	1,7 h	49,00 €/h	444,40 €	-9,6 %
2020	1,8 h	49,00 €/h	467,60 €	-4,9 %
MW	2,0 h	46,10 €/h	491,81 €	

Tabelle 10.45: Datenbereinigung Reinigung Innenbeleuchtung Vergleichstunnel

Jahr	Dauer	Mittellohn	Kosten	Differenz zum Mittelwert
2009	3,0 h	42,00 €/h	683,00 €	+82,8 %
2010	1,6 h	42,00 €/h	387,60 €	+3,7 %
2011	-	-	-	-100,0 %
2012	1,4 h	45,00 €/h	358,00 €	-4,2 %
2013	1,5 h	45,00 €/h	380,00 €	+1,7 %
2014	1,7 h	45,00 €/h	424,00 €	+13,5 %
2015	1,2 h	45,00 €/h	314,00 €	-16,0 %
2016	1,3 h	46,00 €/h	339,90 €	-9,0 %
2017	1,4 h	46,00 €/h	362,20 €	-3,1 %
2018	1,5 h	49,00 €/h	398,00 €	+6,5 %
2019	1,6 h	49,00 €/h	421,20 €	+12,7 %
2020	1,3 h	49,00 €/h	351,60 €	-5,9 %
MW	1,5 h	46,10 €/h	373,65 €	

Tabelle 10.46: Datenbereinigung Energiekosten Einfahrtsbeleuchtung Vergleichstunnel

Jahr	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten	Differenz zum Mittelwert
2009	145.610 kWh	0,107 €/kWh	15.580,24 €	-4,4 %
2010	153.605 kWh	0,107 €/kWh	16.435,76 €	+0,9 %
2011	158.679 kWh	0,114 €/kWh	18.089,44 €	+4,2 %
2012	152.375 kWh	0,114 €/kWh	17.370,77 €	+0,1 %
2013	144.380 kWh	0,114 €/kWh	16.459,28 €	-5,2 %
2014	192.814 kWh	0,110 €/kWh	21.209,51 €	+26,7 %
2015	159.602 kWh	0,110 €/kWh	17.556,20 €	+4,8 %
2016	151.606 kWh	0,105 €/kWh	15.918,67 €	-0,4 %
2017	145.302 kWh	0,105 €/kWh	15.256,73 €	-4,6 %
2018	153.298 kWh	0,105 €/kWh	16.096,26 €	+0,7 %
2019	158.218 kWh	0,105 €/kWh	16.612,89 €	+3,9 %
2020	151.914 kWh	0,104 €/kWh	15.799,04 €	-0,2 %
MW	152.235 kWh	0,108 €/kWh	16.470,48 €	

Tabelle 10.47: Datenbereinigung Energiekosten Innenbeleuchtung Vergleichstunnel

Jahr	Energieverbrauch	Energiepreis	Energiekosten	Differenz zum Mittelwert
2009	141.823 kWh	0,107 €/kWh	15.175,01 €	-3,9 %
2010	153.667 kWh	0,107 €/kWh	16.442,34 €	+4,1 %
2011	147.206 kWh	0,114 €/kWh	16.781,51 €	-0,3 %
2012	143.053 kWh	0,114 €/kWh	16.308,05 €	-3,1 %
2013	155.513 kWh	0,114 €/kWh	17.728,43 €	+5,4 %
2014	116.288 kWh	0,110 €/kWh	12.791,71 €	-21,2 %
2015	142.592 kWh	0,110 €/kWh	15.685,08 €	-3,4 %
2016	83.371 kWh	0,105 €/kWh	8.753,93 €	-43,5 %
2017	147.822 kWh	0,105 €/kWh	15.521,26 €	+0,2 %
2018	142.284 kWh	0,105 €/kWh	14.939,82 €	-3,6 %
2019	154.282 kWh	0,105 €/kWh	16.199,61 €	+4,5 %
2020	147.514 kWh	0,104 €/kWh	15.341,44 €	+0,0 %
MW	147.575 kWh	0,109 €/kWh	16.012,25 €	

10.4.4 Kennzahlenbildung

Zur Bildung von aussagekräftigen Kennzahlen wird auf die in Abs. 9.2 bestimmten Bezugsgrößen und Einheiten zurückgegriffen. Für die Tunnelreinigung wird dabei auf die Tunnellänge als Bezugsgröße abgestellt, da die Höhe der zu reinigenden Fläche mit 3,00 m für beide Bauwerke identisch ist.

Die jährlichen Schwankungen in den Kostengrößen erschweren die gezielt Bestimmung von Abweichungen für das Benchmarking. Besonders dann, wenn die Ausschläge der Vergleichsgrößen konträr verlaufen. Zur Ausschaltung entsprechender Schwankungen in den Einzelgrößen wird für den weiteren Vergleich vereinfacht der Mittelwert als statistischer Durchschnittswert zur Kennzahlenbildung herangezogen (Tabelle 10.48 und Tabelle 10.49).

Tabelle 10.48: Kennzahlen Mustertunnel

Prozess	Mustertunnel		
	Kosten	Bezugsgröße	Kennzahlen
Reinigung Tunnelwände	6.325,80 €	2.400 m	2,64 €/m
Versorgung Einfahrtsbeleuchtung	26.394,41 €	-	26.394,41 €
Versorgung Innenbeleuchtung	26.872,06 €	2.400 m	11,20 €/m
Reinigung Einfahrtsbeleuchtung	746,66 €	332 Stck.	2,25 €/Stck.
Reinigung Innenbeleuchtung	619,52 €	276 Stck.	2,24 €/Stck.

Tabelle 10.49: Kennzahlen Vergleichstunnel

Prozess	Vergleichstunnel		
	Kosten	Bezugsgröße	Kennzahlen
Reinigung Tunnelwände	2.757,32 €	1.500 m	1,84 €/m
Versorgung Einfahrtsbeleuchtung	16.470,48 €	-	16.470,48 €
Versorgung Innenbeleuchtung	16.012,25 €	1.500 m	10,67 €/m
Reinigung Einfahrtsbeleuchtung	491,81 €	212 Stck.	2,32 €/Stck.
Reinigung Innenbeleuchtung	373,65 €	172 Stck.	2,17 €/Stck.

10.4.5 Vergleich der Kennzahlen

Zur Identifizierung von Abweichungen und daraus abgeleiteten Optimierungsansätzen ist ein Vergleich der in Abs. 10.4.4 gewonnenen Kennzahlen für die beiden Tunnelbauwerke (Mustertunnel und Vergleichstunnel) vorzunehmen.

Tabelle 10.50: Gegenüberstellung der Kennzahlen

Prozess	Mustertunnel	Vergleichstunnel	Differenz	Abweichung
Reinigung Tunnelwände	2,64 €/m	1,84 €/m	+0,80 €/m	+43,4 %
Versorgung EB	26.394,41 €	16.470,48 €	+9.923,93 €	+60,3 %
Versorgung IB	11,20 €/m	10,67 €/m	+0,52 €/m	+4,9 %
Reinigung EB	2,25 €/Stck.	2,32 €/Stck.	-0,07 €/Stck.	-3,1 %
Reinigung IB	2,24 €/Stck.	2,17 €/Stck.	+0,07 €/Stck.	+3,3 %

EB - Einfahrtsbeleuchtung | IB - Innenbeleuchtung

Die in Tabelle 10.50 erfolgte Gegenüberstellung der Kennzahlen zeigt, dass für die Prozesse Versorgung Innenbeleuchtung sowie Reinigung Einfahrts- und Innenbeleuchtung keine signifikanten Abweichungen in den Kostenkennzahlen vorliegen. Anders verhält es sich für die Reinigung des Gewölbes sowie die Energieversorgung der Einfahrtsbeleuchtung. Für beide Prozesse sind deutliche Leistungslücken von 43 % bzw. 60 % zu erkennen. Zur Veranschaulichung der Abweichungen wurde zusätzlich zur rechnerischen Gegenüberstellung eine Visualisierung der Ergebnisse in Abbildung 10.19 vorgenommen.

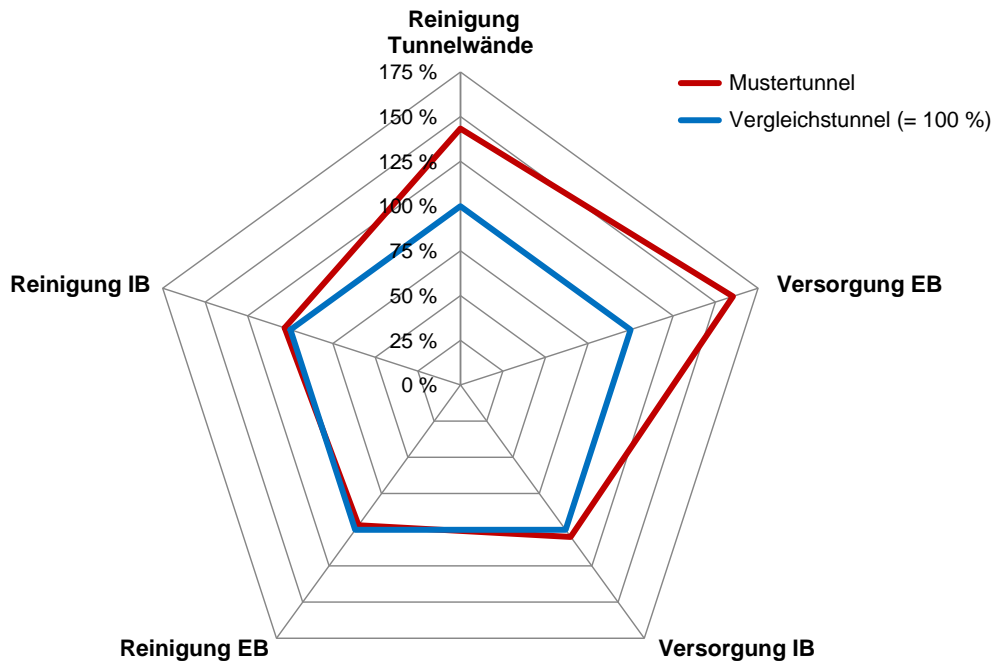


Abbildung 10.19: Differenzen der Kennzahlen Mustertunnel – Vergleichstunnel

Das weitere Vorgehen konzentriert sich auf die festgestellten Leistungslücken für die Prozesse Reinigung Tunnelwände und Versorgung Einfahrtsbeleuchtung. Grundsätzlich können aber auch den scheinbar nicht relevanten Prozessen Einsparungspotentiale erwachsen, die es durch zusätzliche Voranalysen zu bestimmen gilt. Dies kann beispielsweise durch detailliertere Untersuchungen bis in die Ebene der einzelnen Teilleistungen oder durch Benchmarking mit vergleichbaren Prozessen artfremder Bauwerke (z. B. Reinigung der Beleuchtung in Industriehallen) erfolgen.

10.4.6 Analyse und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen

Zur Bestimmung von Optimierungspotentialen aus den Leistungslücken heraus bedarf es einer Analyse und Bewertung der Gründe für die festgestellten Abweichungen. Dazu sind die maßgeblichen Einflussgrößen für die Kosten der einzelnen Prozesse zu identifizieren. Es gilt die Prozesse und die damit einhergehenden Leistungen in Struktur und Abhängigkeit zu durchdringen. Für das vorliegende Beispiel werden hierfür die Prozesse Reinigung Tunnelwände (Gewölbe) sowie Versorgung Einfahrtsbeleuchtung eingehender untersucht. Die wesentlichen Einflussgrößen für die Prozesse werden aus den für das Modulare Prozessmodell erhobenen Schnittstellen abgeleitet (Abs. 10.2.2).

Reinigung Tunnelwände (Gewölbe)

Der Aufwand für die Reinigung der Tunnelwände wird maßgeblich durch den Verschmutzungsdruck (Verkehrsbelastung, Steigungen usw.) sowie der Oberflächenbeschaffenheit der Innenschale bestimmt. Weitere Parameter sind Art und Häufigkeit der Tunnelreinigung, wobei diese Größen für die beiden Bauwerke nahezu identisch sind und somit als mögliche Ursachen nicht in Betracht kommen. Ebenso ist die zu reinigende Fläche, respektive die Tunnellänge, für den vorliegenden Fall nicht zu berücksichtigen, da diese bereits als Bezugsgröße in der Kennzahl Beachtung gefunden hat.

Der Verschmutzungsdruck, ausgelöst durch Verkehrsbelastung, Steigungen usw., kann aufgrund der nahezu identischen Verkehrszahlen und der kaum abweichenden Steigungen als Ursache für die Leistungslücke ausgeschlossen werden.

Bei der Oberflächenbeschaffenheit zeigen sich deutliche Differenzen. Während der Mustertunnel über keine Beschichtung der Tunnelwände verfügt (siehe Abs. 10.3.4), wurde beim Vergleichstunnel eine vollwertige Beschichtung im Bereich bis 3,00 m über der Fahrbahn aufgebracht. Wie allerdings unter Abs. 10.2.5.2 und 10.3.4 gezeigt wurde, ist für den Mustertunnel eine Beschichtung aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll. Die durch die Beschichtung erzielten Einsparungen, beispielsweise bei den Energiekosten der Beleuchtung oder der Reinigung der Tunnelwände, konnten die notwendigen Zusatzkosten für die Beschichtung nur unzureichend ausgleichen. Zusätzlich zeigt sich, dass trotz der Verwendung einer Beschichtung, die Energiekosten für die Innenbeleuchtung des Vergleichstunnels kaum geringer sind (Tabelle 10.50). Die in Abs. 10.2.5.2 und 10.3.4 angesetzten Einsparungen für die Variante mit Beschichtung wären somit wahrscheinlich auch nicht vollumfänglich realisierbar, so dass auf weitere Untersuchungen zur Bestimmung von Optimierungsansätzen an dieser Stelle verzichtet werden kann.

Versorgung Einfahrtsbeleuchtung

Die Kosten für die Energieversorgung der Einfahrtsbeleuchtung werden aus dem Energieverbrauch sowie dem Energiepreis bestimmt. Der Energiepreis der beiden Bauwerke ist als vergleichbar anzusehen und dadurch nicht maßgebend für die festgestellte Leistungslücke (vergleiche Mittelwerte aus Tabelle 10.41 und Tabelle 10.46 – Abs. 10.4.3).

Der Energieverbrauch bestimmt sich aus der erforderlichen Leuchtdichte sowie der Länge der Einfahrtsstrecke.

Die für die Bemessung relevanten Leuchtdichten (Außenleuchtdichte und Leuchtdichte der Innenstrecke) sind nahezu identisch, so dass hieraus kein maßgeblicher Einfluss auf den Energieverbrauch resultieren kann.

Die aus der Außenleuchtdichte abgeleiteten Leuchtdichten in der Einfahrtsstrecke der beiden Bauwerke, mit max. 178,5 cd/m² für den Mustertunnel bzw. max. 136,8 cd/m² für den Vergleichstunnel, zeigen erste wesentliche Unterschiede. Der für die Bestimmung der Leuchtdichten relevante Faktor zur Abbildung des Helligkeitssprungs bei der Tunneleinfahrt (k-Faktor) ist – bei gleicher Beleuchtungsart – ausschließlich von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit abhängig. Während für den Mustertunnel die Höchstgeschwindigkeit auf 100 km/h beschränkt ist, liegt die zulässige Geschwindigkeit im Vergleichstunnel bei 80 km/h. Gleichzeitig nimmt durch die höheren Geschwindigkeiten die Länge der Anhalteweg überproportional zu.⁶⁰⁶ Hieraus resultiert eine Verlängerung der Einsichtstrecke und damit eine Zunahme der Einfahrtstrecke. Dies führt dazu, dass auf einer längeren Strecke die hohen Leuchtdichten des Einfahrtsbereiches aufzubringen sind.

Der maßgebende Grund für die vorliegende Leistungslücke bei den Energiekosten der Einfahrtsbeleuchtung kann damit auf den Unterschied in der zulässigen Höchstgeschwindigkeit des Mustertunnels zurückgeführt werden.

⁶⁰⁶ siehe Exkurs Haltesichtweite Anhang A.2 – Abs. A.2.2.1.8 und die dortige Abbildung A.2.7

Weitergehend ist zu eruieren, inwieweit die Reduzierung der Höchstgeschwindigkeit, und der damit in Verbindung stehenden Maßnahmen, eine Verringerung der Lebenszykluskosten bewirken kann. Zur Identifizierung, ob und in welchem Umfang sich durch die gewählten Maßnahmen eine ökonomische Optimierung einstellt, werden die Lebenszykluskosten, die aus der Umsetzung der Geschwindigkeitsreduzierung resultieren, den Lebenszykluskosten aus der Fortführung des bisherigen Betriebes vergleichend gegenübergestellt. Vereinfacht wird hierzu auf die für die Lebenszykluskostenrechnung in Abs. 10.2 vorgenommene Datenerhebung zurückgegriffen. Die Anzahl der Tunnelleuchten wird dabei den neuen Randbedingungen angepasst und die Kostengrößen auf das neue Bezugsjahr transformiert. Zusätzlich werden die gewonnen Kennzahlen aus Abs. 10.4.4 bzw. die Größen aus dem Vergleichsbauwerk übernommen.

Für die notwendigen Leistungen zur Umsetzung des Optimierungsansatzes (z. B. Austausch Beschilderung, Anpassung der Steuerung) werden pauschal 25.000 € als zusätzliche Kosten berücksichtigt. Der jeweilige Anfallszeitpunkt richtet sich nach der Umsetzung der Leistungen.

Als Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung dient das Jahr 2021. Der Untersuchungszeitraum beträgt damit 94 Jahre.⁶⁰⁷ Für die Lebenszykluskostenrechnung wird ein Kalkulationszinssatz von 3,0 % angesetzt.

In Kenntnis, dass eine Verringerung der zulässigen Geschwindigkeit vom 100 km/h auf 80 km/h ausschließlich auf das Modul der Einfahrtsbeleuchtung Einfluss hat, kann durch die modulare Struktur, die Lebenszykluskostenrechnung auf dieses Modul beschränkt werden.⁶⁰⁸ Einsparungen bei der USV-Anlage bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt.

Zur Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit werden vier Varianten untersucht:

- Variante 0: Die Geschwindigkeit und Einfahrtsbeleuchtung bleiben unverändert (Ausgangsvariante).
- Variante 1: Die Geschwindigkeit und Einfahrtsbeleuchtung werden bei der nächsten Erneuerung der Beleuchtungsanlage angepasst.
- Variante 2: Die Geschwindigkeit wird unmittelbar reduziert (bei reduzierter Beleuchtung), die Einfahrtsbeleuchtung wird erst bei der nächsten Erneuerung angepasst.
- Variante 3: Die Geschwindigkeit und Einfahrtsbeleuchtung werden unmittelbar angepasst.

Ergebnis der Bewertung

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnungen zeigen, dass Variante 2 aus ökonomischer Sicht die vorteilhafteste Ausgestaltung darstellt (Tabelle 10.51). Das Einsparpotential beträgt rund 24 % gegenüber der bisherigen Ausgestaltung (V0). Dabei hat eine unmittelbare Umsetzung einer Geschwindigkeitsreduzierung von 100 km/h auf 80 km/h bei gleichzeitiger Anpassung der Ausleuchtung zu erfolgen. Im Zuge der nächsten Erneuerung der Tunnelleuchten wird abschließend eine auf die neuen Randbedingungen angepasste Beleuchtungsanlage eingebaut.

⁶⁰⁷ Untersuchungszeitraum: 100 Jahre – abzüglich der bisherigen Nutzungsdauer von 6 Jahren.

⁶⁰⁸ Die Änderung der Geschwindigkeit von 100 km/h auf 80 km/h ist für die Innenbeleuchtung nicht von Relevanz. Die für die Bestimmung der erforderlichen Beiwerte bleiben von der Änderung unberührt. vgl. FSV (2014)A, S. 17

Tabelle 10.51: Zusammenstellung der Ergebnisse der Lebenszykluskostenrechnungen⁶⁰⁹

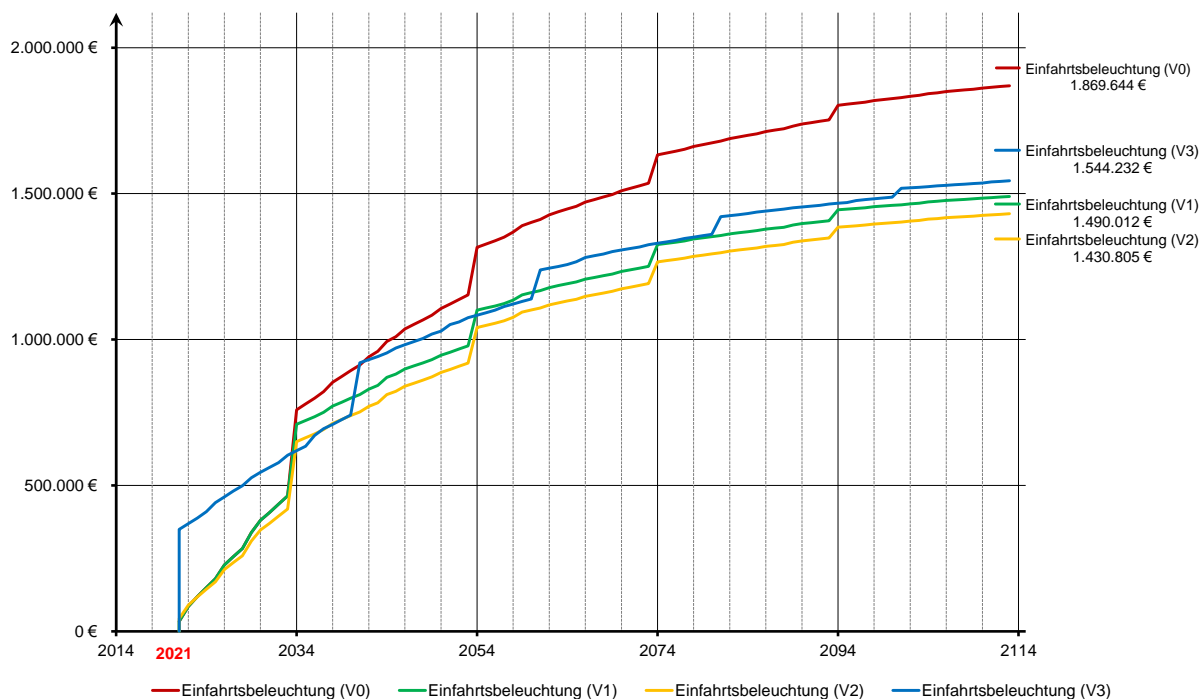
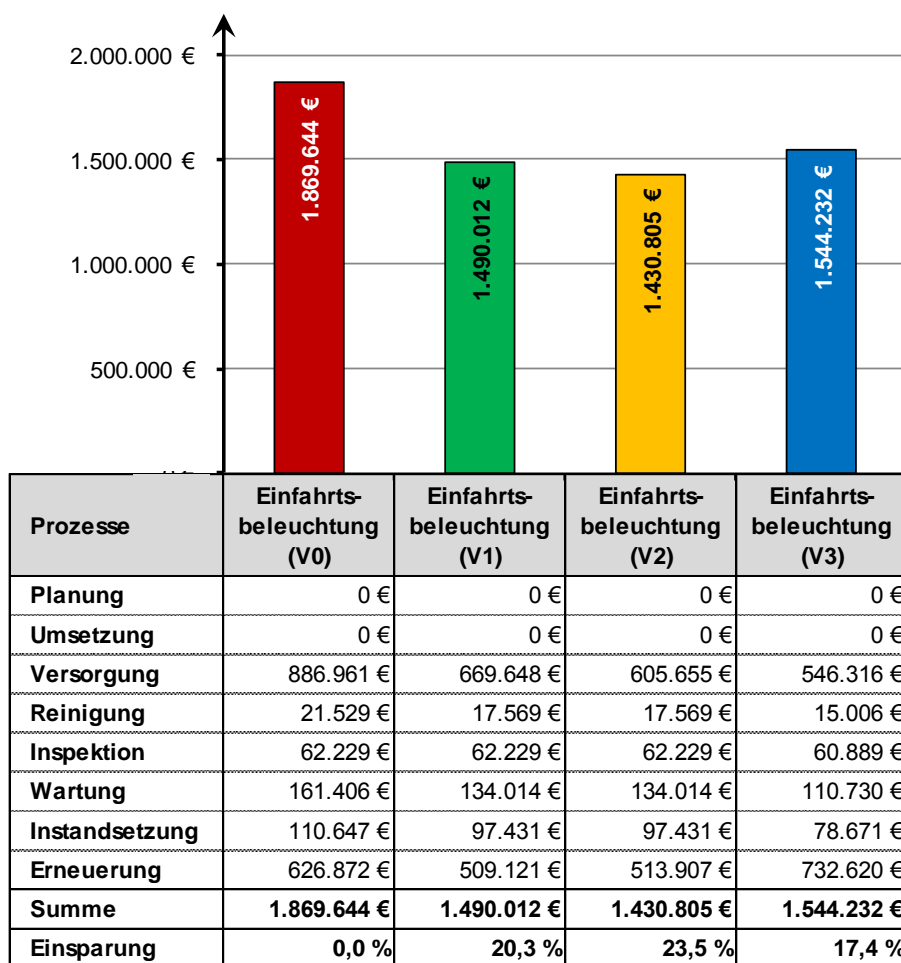


Abbildung 10.20: Verlauf der Lebenszykluskosten aller Varianten

⁶⁰⁹ Unter Einbeziehung eines Kalkulationszinssatzes von 3,0 %.

10.4.7 Umsetzung der Optimierung

Abschließend sind die in Abs. 10.4.6 bestimmten, aus ökonomischer Sicht vorteilhaften Optimierungsmaßnahmen umzusetzen. Ziel ist das Schließen der festgestellten Leistungslücke. Für den Betreiber ist hierzu eine Handlungsanweisung zu erstellen, nach der die einzelnen Schritte in die Praxis überführt werden müssen. An dieser Stelle wird eine stichpunktartige Auflistung der notwendigen Handlungsschritte angeführt. Diese müsste in der Praxis, in Zusammenarbeit mit dem Betreiber und anderen Betroffenen, detailliert ausgearbeitet werden.

Handlungsanweisung:

- Abstimmung der geplanten Maßnahmen mit allen Betroffenen (u. a. Polizei, Feuerwehr usw.);
- Berechnung und Anpassung des Programms zur Steuerung der Beleuchtungsanlage (inkl. Leuchtdichtemessgeräte);
- Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit;
- Inbetriebnahme der neuen Beleuchtungssteuerung mit reduzierter Leuchtdichte;
- Planung und Umsetzung der Erneuerung der Beleuchtungsanlage, ausgerichtet auf die neue Höchstgeschwindigkeit;

Nach der Umsetzung der einzelnen Maßnahmen ist abschließend eine erneute Analyse mit Hilfe des Benchmarking-Konzeptes vorzunehmen. Es ist dabei zu prüfen, ob und in welcher Ausprägung die angestrebten Einsparungen in der Praxis realisiert werden konnten bzw. inwieweit eine Anpassungen zu erfolgen hat.

11 Schlussbetrachtung

11.1 Zusammenfassung

Für Tunnelbauwerke als wesentlicher Bestandteil unserer modernen Verkehrsinfrastruktur ist es bislang üblich, die Entscheidung über den Bau bzw. die Instandsetzung oder Modernisierung eines Tunnelbauwerkes auf Basis der Investitionskosten zu treffen. Ungeachtet der Tatsache, dass zur Gewährleistung von Sicherheit und Verfügbarkeit über die lange Lebensdauer sehr ausgeprägte Folgekosten anfallen. Aus Sicht der Nachhaltigkeit gilt es deshalb zukünftig, den Blickwinkel zu erweitern und die gesamten Kosten im Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes in den Entscheidungsprozess einzubeziehen. Gleichzeitig ist eine gezielte Optimierung der Gesamtkosten anzustreben.

Zur Umsetzung dieser Zielstellung beantwortet die vorliegende Arbeit die Forschungsfrage:

Wie ist eine ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken ganzheitlich umsetzbar?

Unter Berücksichtigung der in der Forschung entwickelten bzw. in der Praxis bereits angewendeten Ansätze wurde hierfür ein Lebenszykluskostenmodell entwickelt, das eine gleichberechtigte Einbeziehung der Erst- und Folgekosten ermöglicht. Dieses Modell bildet die Ausgangsbasis zur Berechnung der Lebenszykluskosten und zur eigenständigen Identifizierung und Umsetzung von Optimierungsansätzen.

Hierfür musste die weiterführende Frage beantwortet werden:

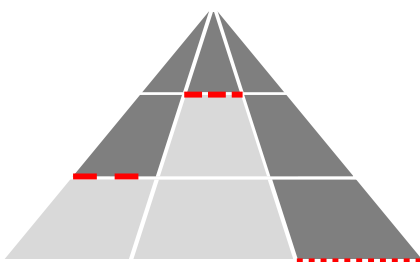
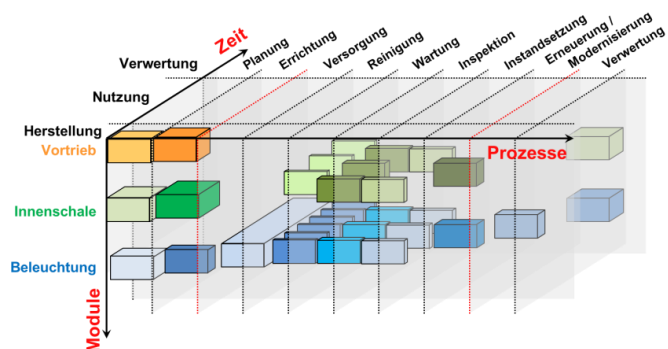
Ist ein hierarchisch strukturiertes Lebenszykluskostenmodell zur ganzheitlichen Erfassung und Optimierung der Gesamtkosten von Tunnelbauwerken geeignet?

Das Modulare Prozessmodell

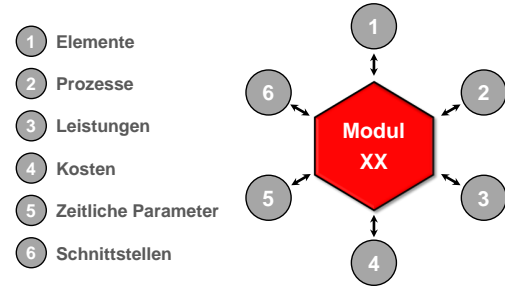
Tunnelbauwerke sind ingenieurtechnisch anspruchsvolle Bauwerke, die aufgrund der zahlreichen Ausstattungselemente eine Symbiose aus Ingenieurbauwerk und technischer Anlage darstellen. Die Komplexität des Bauwerkes macht eine strukturierte Erfassung der

Kosten über die gesamte Lebensdauer erforderlich. Ein rein hierarchisches Modell ist zur Erfüllung der gestellten Anforderungen nicht ausreichend.

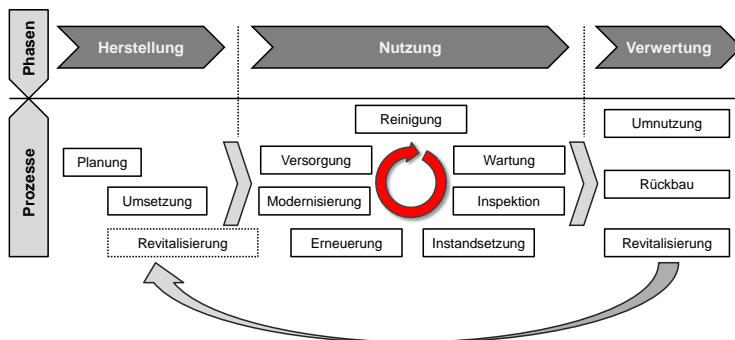
Zur Umsetzung der angestrebten Flexibilität und einer aktiven Optimierung der Lebenszykluskosten wurde die hierarchische Struktur durch eine Modularisierung erweitert. Module stellen dabei weitgehend unabhängige Einheiten dar, die eine vollständige Abbildung des Untersuchungsgegenstandes erlauben. Dadurch wird eine dem Planungs- und Informationsstand anpassbare Bestimmung der Lebenszykluskosten gewährleistet.



Die Definition des Moduls erfolgt ausgehend von der zu erfüllenden technisch-funktionalen Aufgabe, wobei die Kriterien der Unabhängigkeit und Integrität erfüllt werden müssen. Die interne Struktur der Module hat zur Gewährleistung von Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit, unter Einbeziehung der externen Schnittstellen, einem allgemeingültigen Aufbau zu folgen.



Über den gesamten Lebenszyklus eines Tunnelbauwerkes ist eine Vielzahl an unterschiedlichen Leistungen zu erbringen. Art und Umfang der notwendigen Leistungen, aber auch deren Häufigkeit werden im Wesentlichen durch das Modul und die entsprechende Lebensphase bestimmt. Für eine weitergehende Strukturierung sind die daraus resultierenden Kosten den einzelnen Lebensphasen konsequent zuzuordnen. Die Vielfältigkeit



der Leistungen macht eine Erfassung in übergeordneten Prozessen notwendig. Die Prozesse werden dabei so definiert, dass eine allgemeingültige Anwendung über alle Module und Systemebenen hinweg möglich ist.

Mit der Zuweisung von Modulen und Prozessen entsteht letztlich eine konsistente, zweidimensionale Kostenstruktur, die die geforderte Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit gewährleistet. Durch Berücksichtigung einer zeitlichen Komponente wird diese Kostenmatrix um eine dritte Dimension (Zeit) erweitert. Die Einbeziehung der Schnittstellen und Abhängigkeiten vervollständigt das Modulare Prozessmodell für eine ganzheitliche und transparente Kostenerfassung von Tunnelbauwerken.

Methodik zur Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten

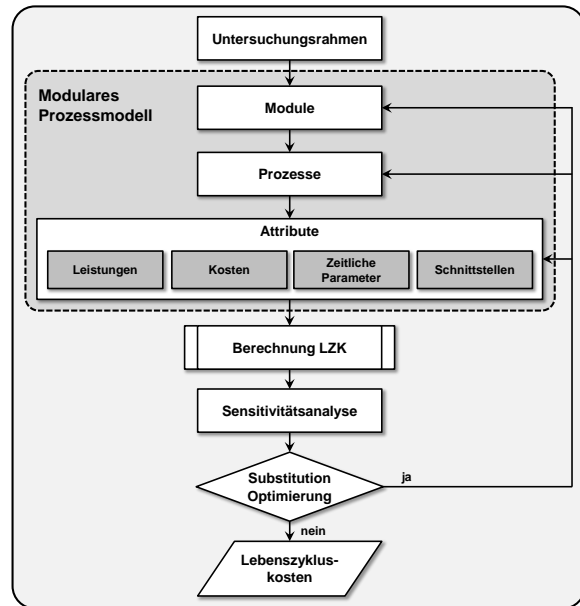
Mit Beantwortung der Frage hinsichtlich der Strukturierung des Lebenszykluskostenmodells musste die weiterführende Forschungsfrage beantwortet werden:

Wie können Substitutions- und Optimierungspotentiale gezielt aus einem Lebenszykluskostenmodell erarbeitet werden?

Die angestrebte ökonomische Optimierung macht eine eigenständige Methodik erforderlich, die – ausgehend vom Modularen Prozessmodell – eine transparente Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten als Zielstellung verfolgt.

Hierfür ist der Untersuchungsrahmen – unter Gewährleistung einer Vergleichbarkeit, beispielsweise eines konsistenten Sicherheitsniveaus aller Alternativen – festzulegen. Die einzelnen Module und die zugehörigen Prozesse sind zu bestimmen. Zur Vervollständigung des Modularen Prozessmodells sind die Module mit den Attributen Leistungen, Kosten, Zeitliche Parameter sowie interne und externe Schnittstellen vollumfänglich auszugestalten.

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt beispielhaft auf Basis der Kapitalwertmethode als dynamisches Rechenverfahren aus der Investitionsrechnung. Der ermittelte Kapitalwert dient als Vergleichswert aller zu bewertenden Alternativen. Durch die Offenheit der Systematik ist auch eine Einbindung alternativer Berechnungsverfahren der Investitionsrechnung möglich. Die gewählte Strukturierung erlaubt neben der Aufsummierung der Gesamtkosten des definierten Untersuchungsrahmens eine system-, baugruppen- und modulweise Auswertung. Erweiternd kann durch Aggregation gleichartiger Prozesse bzw. übereinstimmender Lebensphasen eine prozess- bzw. phasenbezogene Beurteilung erfolgen.

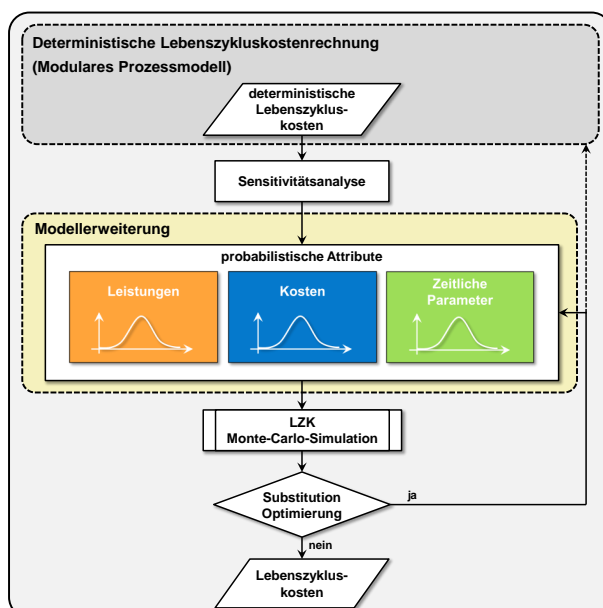


Für die Optimierung der Kosten sind durch vorgelagerte Sensitivitätsanalysen die wesentlichen Einflussgrößen zu bestimmen. Aus dieser Kenntnis heraus, und unter Einbeziehung der externen und internen Schnittstellen aus dem Modularen Prozessmodell, ist eine Identifizierung von Optimierungsansätzen gegeben. Dadurch ist eine gezielte Anpassung bzw. Substitution von Modulen, Prozessen oder Attributen zur ganzheitlichen Optimierung der Lebenszykluskosten umsetzbar. Zur Identifizierung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit erfolgt eine Gegenüberstellung der Lebenszykluskosten der einzelnen Varianten.

Modellerweiterung zur Berücksichtigung unsicherer Eingangsgrößen

Ausgehend von der bislang deterministischen Bestimmung der Lebenszykluskosten galt es die weiterführende Forschungsfrage zu beantworten:

In welcher Form können Unsicherheiten aus der Kostenprognose Berücksichtigung in der Lebenszykluskostenrechnung finden?



Bei den bisherigen Betrachtungen wurde vorausgesetzt, dass sämtliche Attribute (Kosten, Anfallszeitpunkt usw.) als deterministische Größen vorliegen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Eingangsdaten mit Sicherheit vorhergesagt werden können. Bei einer Lebenszykluskostenrechnung handelt es sich allerdings um eine modellhafte Abbildung zukünftiger Ereignisse. Die verwendeten Daten für die Kostenprognose sind mit Unsicherheiten behaftet. Zur Berücksichtigung der hieraus resultierenden Risiken wird das Modulare Prozessmodell durch die Implementierung probabilistischer Eingangsgrößen erweitert.

Der mit der Erhebung dieser Daten verbundene Arbeitsaufwand macht es erforderlich, den Fokus auf Attribute zu richten, die das Ergebnis signifikant beeinflussen. Mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen sind diese wesentlichen Risikofaktoren im Vorfeld zu identifizieren. Zur Bestimmung der Lebenszykluskosten und der Generierung von Optimierungsansätzen wird, unter Verwendung der entwickelten deterministischen Vorgehensweise, die Systematik der Monte-Carlo-Simulation in die erweiterte Methodik integriert.

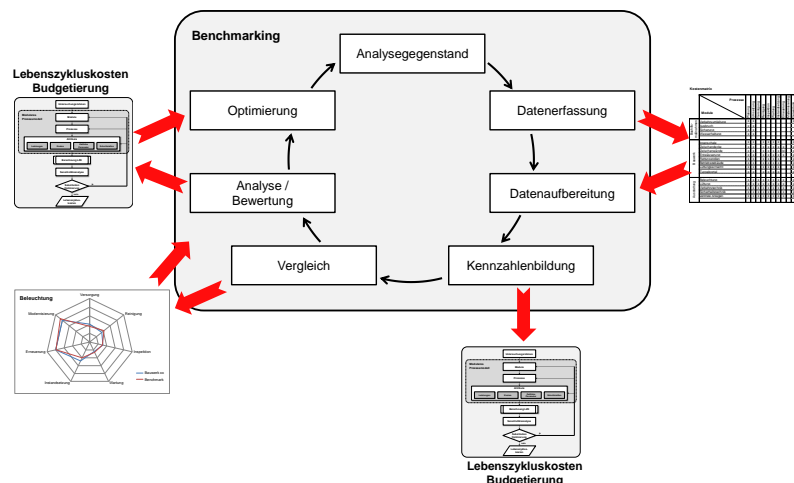
Kontinuierliche Optimierung

Für eine stetige Generierung von Optimierungsmöglichkeiten mussten zusätzliche Ansätze entwickelt werden. Die Forschungsfrage lautete:

Wie kann eine kontinuierliche Optimierung der Gesamtkosten von Tunnelbauwerken umgesetzt werden?

Das bisherige Vorgehen zur Optimierung der Kosten von Tunnelbauwerken konzentriert sich im Wesentlichen auf die Planungsphase im Zuge eines Neubaus bzw. einer grundlegenden Sanierung von Bestandsbauwerken. Zur Umsetzung einer kontinuierlichen Optimierung erfolgt eine Adaption des aus anderen Fachbereichen bekannten Konzepts des Benchmarking.

Das Modulare Prozessmodell, mit der darin implementierten Kostenstruktur und der Möglichkeit zur Untersuchung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit mit Hilfe der Lebenszykluskostenrechnung, bildet die Grundlage für die Umsetzung der kontinuierlichen Optimierung.



Durch den fortwährenden Vergleich mit anderen Bauwerken, Modulen bzw. Prozessen werden Leistungslücken aufgedeckt und hieraus Optimierungsansätze abgeleitet. Zur Bestimmung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit der einzelnen Ansätze wird auf die Methodik zur Bestimmung der Lebenszykluskosten (deterministisch oder probabilistisch) zurückgegriffen.

Als Nebenprodukt der dauerhaften Datenerhebung erhält das Tunnelmanagement einen Überblick über die laufenden Kosten sowie den Gesamtzustand des Bauwerkes. Es wird ein Bewusstsein für die Relevanz der einzelnen Kostengrößen geschaffen. Dies erleichtert die Strategieausrichtung für das Instandhaltungsmanagement (bzw. Bauwerksmanagement) und unterstützt die Entscheidungsfindung für zukünftige Investitionen.

Ergebnis

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist ein Lebenszykluskostenmodell, das eine transparente und nachvollziehbare Bestimmung und Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken ermöglicht. Der Aufbau des Modulare Prozessmodells eröffnet dabei die Option einer universellen Anwendung auch für andere Bauwerkstypen, wie z. B. Brücken, Hochbauimmobilien usw. – unter Anpassung an die jeweilige Zielstellung.

11.2 Prüfung der geforderten Kriterien für Modell und Methodik

In Abs. 2.3 wurden Kriterien für das zu entwickelnde Modell bzw. die damit in Verbindung stehende Methodik aufgestellt. Zum Abschluss ist zu prüfen, ob diese Kriterien mit den entwickelnden Elementen vollumfänglich erfüllt wurden.

Die Applikation zur Verifizierung von Modell und Methodik hat gezeigt, dass mit dem Modularen Prozessmodell eine **transparente**, von Zielstellung und Informationsdichte geprägte, **ganzheitliche** Ermittlung der Kosten von Tunnelbauwerken ermöglicht wird. Der gewählte modulare Aufbau schafft die Basis für eine gezielte Zusammenstellung des Untersuchungsrahmens. Es entsteht die Möglichkeit, unter Berücksichtigung vorhandener Interdependenzen einzelne Module bzw. Prozesse isoliert einer **detaillierten** Analyse zu unterziehen. Vorhandene Module können einfach substituiert bzw. neue Module eingebunden werden. Die Integration neuer Entwicklungen bzw. steigende (sicherheitstechnische) Anforderungen können somit hinsichtlich deren Einfluss auf die Lebenszykluskosten explizit bewertet werden. Die zusätzliche hierarchische Strukturierung eröffnet darüber hinaus die Option, die Betrachtungstiefe für die einzelnen Untersuchungsgegenstände entsprechend dem Planungs- und Informationsstand bzw. der Zielstellung **flexibel** anzupassen.

Die Anwendung des Modells hat gezeigt, dass im Verfahrensablauf der Methodik, allein durch die Kenntnis der internen und externen Schnittstellen der einzelnen Module, **Optimierungsansätze** abgeleitet und bewertet werden können. Dank der modularen Struktur können nach Identifizierung ökonomischer Schwachstellen einzelne Module gezielt optimiert werden.

Durch die vorgenommene Erweiterung des Modularen Prozessmodells ist die Möglichkeit gegeben, vorhandene **Unsicherheiten** in Form von probabilistischen Eingangsgrößen in die Lebenszykluskostenrechnung einzubinden. Mit Hilfe der Monte-Carlo-Simulation erfolgt dabei eine wahrscheinlichkeitsbasierende Bestimmung der Lebenszykluskosten, ohne die Transparenz des Modularen Prozessmodells zu verändern.

Die Entwicklung einer allgemeingültigen **konsistenten Strukturierung** ermöglicht eine Übertragung bereits entwickelter Lösungsansätze auf andere Projekte. Die damit einhergehende Vergleichbarkeit bietet die Chance zur Umsetzung der Benchmarking-Methode für eine kontinuierliche Generierung von Optimierungspotentialen.

Die beispielhafte Anwendung der einzelnen Tools hat gezeigt, dass alle gestellten Anforderungen vollumfänglich erfüllt wurden. Die entwickelte Methodik und das darin eingebettete Modulare Prozessmodell ermöglichen die in der Zielstellung geforderte ökonomisch optimierte Ausgestaltung von Tunnelbauwerken.

Erweiternd wird durch das Modulare Prozessmodell ein **Bewusstsein** für die einzelnen Kostengrößen geschaffen. Die Applikation hat gezeigt, dass durch die dezidierte Auseinandersetzung mit den notwendigen Leistungen auch ohne vorliegende Datenbanken eine Identifizierung von Kostentreibern und wesentlichen Einflussgrößen erfolgen kann. Vertiefte Untersuchungen mit diesen Parametern erlauben es, die künftigen Betriebs- und Instandhaltungsstrategien gezielt zu planen und umzusetzen und dabei das Risikopotential der einzelnen Kostengrößen in der Lebenszykluskostenrechnung deutlich zu senken.

11.3 Ausblick

Bildung eines Modulkataloges und Datengenerierung

Mit dem Modularen Prozessmodell und den zugehörigen Methoden wurde ein Ansatz entwickelt, der eine ganzheitliche Erfassung und Optimierung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken ermöglicht. Bislang existiert allerdings keine systematische Aufbereitung oder allgemeingültige Zusammenstellung der verwendeten Elemente für Tunnelbauwerke. Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um die Entwicklung einer grundlegenden Struktur und Methodik. Die Ausgestaltung des dabei entstandenen Lebenszykluskostenmodells erfolgte exemplarisch, ausgerichtet auf Tunnelbauwerke der Straßeninfrastruktur. Die Grundsätze des Modularen Prozessmodells wurden dabei so allgemein formuliert, dass das Modell die Ausgangsbasis für die weitere Entwicklung von Modulen und Prozessen darstellt. Es wurde aufgezeigt, dass die modulare Struktur und die Erweiterbarkeit des Modells eine baukastenartige Ausgestaltung hinsichtlich des Untersuchungsgegenstandes ermöglichen. Für die zukünftige projektspezifische Anwendung ist ein „Modulkatalog“ zu erarbeiten, in dem vollständig ausgestaltete Module aller Arten von Tunnelbauwerken erfasst sind. Ziel muss es sein, den jeweiligen Untersuchungsrahmen nahezu vollständig mit den vorhandenen Modulen abbilden und durch geringfügige Anpassungen auf die gewählte Zielstellung anpassen zu können. Zur Datenerhebung, insbesondere für probabilistische Größen, sind die in Abs. 3.2.7 vorgestellten Ansätze in die entwickelten Methoden zu implementieren.

Für die Erstellung eines „Modulkataloges“ ist eine Erhebung von Daten realer Bauwerke notwendig. Wie die Applikation gezeigt hat, existieren bislang nur unzureichende und zudem sehr unstrukturierte Datensätze. Auf Basis der entwickelten Kostenstruktur gilt es validierte Daten für die vollumfängliche Ausgestaltung der Attribute zu erheben. Diese wiederum bilden die Grundlage, beispielsweise in Form aussagekräftiger Kennzahlen, für zukünftige Kostenplanungen bzw. Investitions- oder Strategieentscheidungen.

Quantitative Ausgestaltung der Schnittstellen

Neben Kostengrößen sind bislang auch kaum Daten zur Verifizierung der Schnittstellen und Wechselwirkungen erhoben. Aktuell müssen diese noch abgeschätzt bzw. über andere Hilfsmittel bestimmt und eingegrenzt werden. Hier hat zur Unterstützung des Modells eine gezielte Datenerhebung und -auswertung zu erfolgen, um zukünftig quantitative Abhängigkeitsausprägungen in das Modell zu integrieren. Erweiternd ist diese Einbindung quantifizierter Abhängigkeiten durch Anwendung beispielsweise von Markov-Netzen oder Baye'schen-Netzen für alle Attribute anzustreben. Das dadurch entstehende probabilistische Netzwerk würde eine übersichtliche Spezifizierung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilungen erlauben.⁶¹⁰

Anwenderfreundliche EDV-gestützte Umsetzung

Zur Überführung in die praktische Anwendung hat eine weiterführende EDV-gestützte Umsetzung von Modell und Methoden zu erfolgen. Die programmtechnischen Abläufe sind dabei anwenderfreundlich auszugestalten, so dass eine breite Akzeptanz zu einer dauerhaften Integration in den Entscheidungsprozess führt. Dabei gilt es auch, die Schnittstelle zur Kostenerfassung des Betreibers in der Form auszubilden, dass zukünftig Betriebsdaten automatisch in die Datenbanken überführt werden können. Vorhandene Strukturen sind dabei anzugleichen bzw. auf die neue Zielstellung auszurichten.

⁶¹⁰ vgl. BEIERLE, KERN-ISBERNER (2008), S. 365 ff.

Erweiterung des Untersuchungsumfangs durch Einbindung von Einnahmen

Zur Einbindung von Einnahmen in die Lebenszykluskostenrechnung ist eine Erweiterung der Kostenstruktur vorzunehmen. Dies kann durch direkte Zuweisung der monetären Größen zu den einzelnen Modulen, beispielsweise durch Erweiterung des Prozessrahmens erfolgen. Alternativ wäre auch die Einführung eines Subsystems „Einnahmen“, mit der Möglichkeit zur Bildung von spezifischen Modulen (z. B. Modul „Maut“ oder Modul „Energiegewinnung“), umsetzbar. Entsprechendes ist auch für die übergeordneten Kostengrößen aus Grundstücks-, Kapital-, Verwaltungs- oder Objektmanagementkosten anzustreben.

Zusätzliches Anwendungsspektrum für die Break-Evan Analyse

Die vorgestellten Ansätze des Modularen Prozessmodells können erweiternd zur Unterstützung von Break-Evan-Analysen dienen. Hierfür sind Attributsausprägungen zu bestimmen, ab welcher eine Umsetzung des Untersuchungsgegenstandes (Neubau, Sanierung usw.) aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist. Dies dient sowohl der transparenten Entscheidungsfindung als auch der Bewusstseinschärfung für die dem Projekt immanenten Risiken.

Erweiterung zur Umsetzung nachhaltiger Tunnelbauwerke

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war die ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken, zur Umsetzung der ökonomischen Nachhaltigkeit. Für die Realisierung einer ganzheitlichen Nachhaltigkeit ist diese eingeschränkte Betrachtung um die Nachhaltigkeitskriterien Ökologie, Soziales bzw. Technik zu erweitern.⁶¹¹ Ausgangsbasis wäre hierfür das Modulare Prozessmodell, das durch Integration weiterführender Attribute und Kriterien (z. B. Treibhauspotential, CO₂-Emissionen usw.) eine verursachungsgerechte Zuweisung der einzelnen Nachhaltigkeitskriterien ermöglicht.⁶¹² Zusätzlich wäre der Betrachtungsrahmen, wie beispielsweise von SAUER und FISCHER⁶¹³ angestrebt, durch Einbindung der vor- bzw. nachgelagerten Verkehrswege weiter zu fassen. Dazu zählt auch eine Integration des angestrebten bzw. vorliegenden Sicherheitsniveaus in den Entscheidungsprozess.⁶¹⁴

Einbindung weiterführender Kriterien in das Benchmarking

Mit Blick auf eine kontinuierliche Optimierung des Tunnelbauwerkes ist ebenfalls eine Erweiterung des Untersuchungsgegenstandes für das Benchmarking anzustreben. Beispielsweise ist durch Einbeziehung nicht monetärer Kriterien, wie z. B. der Verfügbarkeit des Bauwerkes, der Dauerhaftigkeit einzelner Bauteile oder der oben angeführten Nachhaltigkeitskriterien, der Betrachtungsrahmen für das Benchmarking zu erweitern.

⁶¹¹ vgl. z. B. KUHLMANN ET AL. (2011)

⁶¹² Erste Ansätze hierzu liefern ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013) bzw. SCHWARZ, ENGELHARDT (2013) unter Rückgriff auf das von LISSON (2013) entwickelte Modell zur ganzheitlichen Projektbewertung. Alternativ wäre eine Einbindung des Modularen Prozessmodells in das von KAMARIANAKIS (2013) vorgestellte Entscheidungsmodell möglich.

⁶¹³ vgl. SAUER, FISCHER (2013)

⁶¹⁴ vgl. VOLLMANN, THEWES, KAMARIANAKIS (2012); THEWES ET AL. (2013)B; THEWES ET AL. (2014)

Literaturverzeichnis**A AHRENS ET AL. (2013)**

Ahrens, M. A.; Strauss, A.; Mark, P.; Stangenberg, F.: *Lebensdauerorientierter Entwurf, Konstruktion, Nachrechnung*. In: Beton-Kalender 2013, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013, Teil I, S. 17-222.

AMMON (2009)

Ammon, U.: *Delphi-Befragung*. In: Handbuch Methoden der Organisationsforschung. VS Verlag, Wiesbaden, 2009, S. 458-476.

ASFINAG (2012)A

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG): *Technisches Planungshandbuch – Tunnel-Beleuchtung (BEL) – Technische Richtlinie*. Dokument-Nr. 800.562.1000, Eigenverlag, Wien (AUT), 2012.

ASFINAG (2012)B

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG): *Technisches Planungshandbuch – Tunnel-Lüftung (TLü) – Technische Richtlinie*. Dokument-Nr. 800.542.1000, Eigenverlag, Wien (AUT), 2012.

ASFINAG (2012)c

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG): *Technisches Planungshandbuch – Tunnel-Lüftung (TLü) – Technische Spezifikation*. Dokument-Nr. 800.542.2000, Eigenverlag, Wien (AUT), 2012.

ASFINAG (2013)

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG): *Technisches Planungshandbuch – Tunnel-Lüftung (TLü) – Technische Spezifikation*. Dokument-Nr. 800.542.2000, Eigenverlag, Wien (AUT), 2013.

ASTRA (2008)

Bundesamt für Straßen (ASTRA): *Lüftung der Straßentunnel – Systemwahl, Dimensionierung und Ausstattung (ASTRA 13001)*. Eigenverlag, Bern (CH), 2008.

AUER, ROTTMANN (2010)

Auer, B.; Rottmann, H.: *Statistik und Ökonometrie für Wirtschaftswissenschaftler*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2010.

B BAHR (2008)

Bahr, C.: *Realdatenanalyse zum Instandhaltungsaufwand öffentlicher Hochbauten – Ein Beitrag zur Budgetierung*. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2008.

BALDWIN, CLARK (1998)

Baldwin, C., Y.; Clark, K., B.: *Modularisierung: Ein Konzept wird universell*. In: Harvard Business Manager, Heft 2/1998, Manager-Magazin Verlagsgesellschaft, Hamburg, 1998, S. 39-48.

BALTZER (2012)

Baltzer, W.: Quantitative Risikoanalyse – Ein Mittel zur Beurteilung der Sicherheit von Straßentunneln. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser. Universität der Bundeswehr München, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Neubiberg, 2012, S. 175-181.

BAST (2007)

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln*. Ausgabe Dezember 2007, Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Brücken- und Ingenieurbau, Bergisch Gladbach, 2007.

BAST (2009)

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.): *Sicherheit und Schutz von Straßentunneln - Aktuelle Fragestellungen und Entwicklungen*. Tagungsband, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2009.

BAST (2012)

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING – Teil 5 Tunnelbau*. Ausgabe 03/2012, Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Brücken- und Ingenieurbau, Bergisch Gladbach, 2012.

BAST (2013)

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt): *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING – Teil 3 Massivbau*. Ausgabe 12/2013, Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Brücken- und Ingenieurbau, Bergisch Gladbach, 2013.

BBR (2001)

Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): *Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Stand Januar 2001*. Herausgegeben im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin, 2001.

BECKER (1986)

Becker, C.: *Lebenszykluskosten. Grundlagen und Anwendung bei „Serienprodukten“*. In: Symposium Life Cycle Cost (1985), Hrsg. Schelle, H., Gesellschaft für Projektmanagement INTERNET Deutschland e. V., München, 1986, S. 23-50.

BEDFORD, COOKE (2001)

Bedford, T.; Cooke, R.: *Probabilistic Risk Analysis: Foundations and Methods*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2001.

BEIERLE, KERN-ISBERNER (2008)

Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: *Methoden wissensbasierter Systeme*. Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.

BERNARDS (2005)

Bernards, M.: *Modulare Prüfplanung*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Aachen, 2005.

BERNER ET AL. (2009)

Berner, F. et. al: *Entwicklung eines standardisierten Verfahrens zur Gesamtkostenkalkulation von PPP-Projekten*. Forschungsbericht, Band I – Grundlagen, Herausgeber Institut für Baubetriebslehre, Universität Stuttgart, 2009

BERTSCHE, LECHNER (2004)

Bertsche, B.; Lechner, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau – Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*. Springer Verlag, Berlin, 2004.

BGW (2012)

Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege (BGW): *BGV A3 Unfallverhütungsvorschrift „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“*. Fassung: Januar 1997 (Erster Nachtrag), Stand 04/2012, Eigenverlag, Hamburg, 2012.

BIROLINI (1997)

Birolini, A.: *Zuverlässigkeit von Geräten und Systemen*. Springer Verlag, Zürich (CH), 1997.

BLEES (2011)

Blees, C.: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*. Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, Hamburg, 2011.

BLOBEL, LOHRMANN (2012)

Blobel, V.; Lohrmann, E.: *Statistische und numerische Methoden der Datenanalyse*. Online Ausgabe, <http://www-library.desy.de/elbook.html>, 2012, abgerufen am 28.08.2013.

BLOHM, LÜDER (1991)

Blohm, H.; Lüder, K.: *Investition*. Verlag Franz Vahlen, München, 1991.

BLOHM, LÜDER, SCHAEFER (2012)

Blohm, H.; Lüder, K.; Schaefer, C.: *Investition – Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. Verlag Franz Vahlen, München, 2012.

BMF (2011)

Bundesministerium der Finanzen (BMF): *Arbeitsanleitung Einführung in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen*. Rundschreiben, <http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/pdf/BMF-IIA3-20110112-SF-A001.pdf>, 2011, abgerufen am 05.04.2013.

BMF (2013)A

Bundesministerium der Finanzen: *Bundeshaushaltsordnung (BHO)*. Ausfertigungsdatum: 19.08.1969, zuletzt geändert Artikel 2 des Gesetzes vom 15.07.2013, <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bho/gesamt.pdf>, abgerufen am 10.02.2014.

BMF (2013)B

Bundesministerium der Finanzen: *Personalkosten, Sachkosten und Kalkulationszinssätze in der Bundesverwaltung für Kostenberechnungen und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen 2012*. http://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Oeffentliche_Finzen/Bundeshaushalt/personalkostensaetze-2012-anl.pdf?__blob=publicationFile&v=9, abgerufen am 08.05.2014.

BMJV (2013)

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV): *Bundesfernstraßengesetz (FStrG)*. Zuletzt geändert durch Art. 7 G v. 31.5.2013, <http://www.gesetze-im-internet.de/fstrg/BJNR009030953.html>, abgerufen am 28.02.2014.

BMV (1985)

Bundesministerium für Verkehr (BMV): *Anweisung zur Kostenberechnung von Straßenausbauvorhaben (AKS) mit Mustereintragen*. Stand Februar 1985, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1985.

BMV (1990)

Bundesministerium für Verkehr (BMV): *Überprüfung der Bemessungsgrundlagen für die Be- und Entlüftung von städtischen Straßentunneln in Hinblick auf die Verringerung der Schadstoffemissionen bei den Kraftfahrzeugen*. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 638, Eigenverlag, Bonn, 1990.

BMVBS (2005)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Die gesamtwirtschaftliche Bewertungsmethodik Bundesverkehrswegeplan 2003*. Stand Januar 2005, Berlin, 2005.

BMVBS (2006)A

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinie zur Ermittlung und Verrechnung der Kosten im Straßenbetriebsdienst an Bundesfernstraßen*. Stand 2006, Berlin, 2006.

BMVBS (2006)B

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 10/2006*. Sachgebiet 05.9: Tunnelausstattung, Berlin, 2006.

BMVBS (2006)c

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Leitfaden „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei PPP-Projekten“*. Berlin, 2006.

BMVBS (2007)A

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076*. Berlin, 2007.

BMVBS (2007)B

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING), Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA)*. Berlin, 2007.

BMVBS (2007)c

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten (RI-ERH-ING), Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ)*. Berlin, 2007.

BMVBS (2010)A

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Handbuch für die Vergabe und Ausführung von freiberuflichen Leistungen im Straßen- und Brückenbau HVA F-StB*. Ausgabe September 2006, in der Fassung vom Mai 2010, Bonn, 2010.

BMVBS (2010)B

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV)*. Bonn, 2010.

BMVBS (2011)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Lieferungen und Leistungen im Straßen- und Brückenbau HVA L-StB*. Ausgabe März 2011, Bonn, 2011.

BMVBS (2012)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Handbuch für eine gute Bürgerbeteiligung – Planung von Großvorhaben im Verkehrssektor*. Berlin, 2012.

BMVBS (2013)A

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten*. Berlin, 2013.

BMVBS (2013)B

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Richtlinien für die Durchführung von Bauaufgaben des Bundes (RBBau)*. Berlin, 2013.

BMVBS (2013)c

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Organisation, Kosten – Dokumentation 2013*. Eigenverlag, Berlin, 2013.

BMVBS (2014)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS): *Bundesverkehrswegeplan 2015: Methodische Weiterentwicklung und Forschungsvorhaben*. Quelle: <http://www.bmvi.de//SharedDocs/DE/Artikel/UI/bundesverkehrswegeplan-2015-methodische-weiterentwicklung-und-forschungsvorhaben.html?nn=121406>, abgerufen am 22. Januar 2014.

BMVBW (1995)

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW): *Richtlinien für das Aufstellen von Bauwerksentwürfen für Ingenieurbauten – RAB-ING*. Ausgabe April 1995, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1995.

BMVBW (1998)

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW): *Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“*. Ausgabe 1998, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 1998.

BMVBW (2000)

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW): *Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln*. Ausgabe 2000, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 2000.

BMVBW (2001)

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW): *Bauwerksprüfung nach DIN 1076 – Bedeutung, Organisation, Kosten – Dokumentation 1997*. Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund, 2001.

BMVBW (2002)

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW): *Musterleistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf der Konzessionsstrecke*. O. V., o. O., 2002.

BMVBW (2004)

Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW): *Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen*. Version 1.1, Eigenverlag, Bonn, 2004.

BOGENBERGER (2009)

Bogenberger, S.: *Benchmarking im Lebenszyklusmanagement*. In: Immobilien-Benchmarking. 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2009, S. 15-54.

BORCHARDT (1983)

Borchardt, W.: *Kleines Volkswirtschaftslehre Lexikon*. Verlag für Wirtschaftsskripten, München, 1983.

BOSCH (2011)

Bosch, K.: *Elementare Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung*. 11. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.

BOURIER (2011)

Bourier, G.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik*. 7. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.

BOUSSABAIN, KIRKHAM (2006)

Boussabaine, A.; Kirkham, R.: *Whole Life-cycle Costing – Risk and risk responses*. Blackwell Publishing, Oxford (UK), 2006.

BPPP (2007)

Bundesverband Public Private Partnership (BPPP): *PPP für kommunale Straßen – Eine Entscheidungshilfe*. Bundesverband Public Private Partnership e. V., Hamburg, 2007.

BRH (2007)

Bundesrechnungshof (BRH): *Bemerkungen 2007 zur Haushalts- und Wirtschaftsführung des Bundes*. Bundesrechnungshof, Bonn, 2007.

BRILON, LEMKE (2000)

Brilon, W.; Lemke, K.: *Straßenquerschnitte in Tunneln*. Forschungsbericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, Bonn, 2000.

BÜSCH (2013)

Büsch, M.: *Praxishandbuch Strategischer Einkauf*. 3. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2013.

C CAMP (1994)

Camp, R. C.: *Benchmarking*. Hanser Verlag, München, 1994.

CANADA, WHITE (1980)

Canada, J. R.; White, J. A.: *Capital Investment Decision Analysis for Management and engineering*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J. (USA), 1980.

VON CARLOWITZ (1713)

Von Carlowitz, H. C.: *Sylvicultura Oeconomica: hausswirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht*. 1. Auflage, verlegt von Johann Friedrich Braun, Leipzig, 1713.

CARSTENSEN (2008)

Carstensen, P.: *Investitionsrechnung kompakt – Eine anwendungsorientierte Einführung*. 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008.

CHUNG ET AL. (2006)

Chung, S.-H.; Hong, T.-H.; Han, S.-W.; Son, J.-H.; Lee, S.-Y.: *Life Cycle Cost Analysis based Optimal Maintenance and Rehabilitation for Underground Infrastructure Management*. In: KSCE – Journal of Civil Engineering, Vol. 10, No. 4, Springer Verlag, Berlin, 2006, pp. 243-253.

CIE 88 (2004)

Commission internationale de l'éclairage (CIE): *Guide for the lighting of road tunnels and underpasses*. CIE Central Bureau, Wien (AUT), 2004.

CIE 97 (2005)

Commission internationale de l'éclairage (CIE): *Guide on the maintenance of indoor electric lighting systems*. CIE Central Bureau, Wien (AUT), 2005.

CIE 154 (2003)

Commission internationale de l'éclairage (CIE): *The maintenance of outdoor lighting systems*. CIE Central Bureau, Wien (AUT), 2003.

CIE 189 (2010)

Commission internationale de l'éclairage (CIE): *Calculation of tunnel lighting quality criteria*. CIE Central Bureau, Wien (AUT), 2010.

COTTIN, DÖHLER (2013)

Cottin, C.; Döhler, S.: *Risikoanalyse*. 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2013.

CZADO, SCHMIDT (2011)

Czado, C.; Schmidt, T.: *Mathematische Statistik*. Springer Verlag, Berlin, 2011.

D DAFSTB (2001)

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): *DAfStb-Richtlinie – Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen – Teil 1 bis 4*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 2002.

DAENZER (1976)

Daenzer, W. F. (Hrsg.): *System Engineering – Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*. Peter Hanstein Verlag, Köln, 1976/77.

DANGELMAIER (2003)

Dangelmaier, W.: *Produktion und Information – System und Modell*. VDI Springer Verlag, Berlin, 2003.

DÄUMLER, GRABE (2007)

Däumler, K.-D.; Grabe, J.: *Grundlagen der Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung*. 12. Auflage, Verlag Neue Wirtschafts-Briefe GmbH, Herne, 2007.

DEUTSCHER BUNDESTAG (1998)

Deutscher Bundestag: *Abschlussbericht der Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt - Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung“*. Drucksache 13/11200, Sachgebiet 1101, Deutscher Bundestag, Bonn, 1998.

DICKENBROK (2012)

Dickenbrok, B.: *Wirtschaftliche Bewertung von Infrastrukturmaßnahmen zur Anpassung der Streckenleistungsfähigkeit auf Grundlage einer integrierten Systembetrachtung*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Aachen, 2012.

DIEDERICHS (2006)

Diederichs, C. J.: *Immobilienmanagement im Lebenszyklus*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.

DIN 276-1 (2008)

DIN 276-1: *Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau*. Beuth Verlag, Berlin, 2008.

DIN 276-4 (2009)

DIN 276-4: *Kosten im Bauwesen – Teil 4: Ingenieurbau*. Beuth Verlag, Berlin, 2009.

DIN 1076 (1999)

DIN 1076: *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*. Beuth Verlag, Berlin, 1999.

DIN 6280-12 (1996)

DIN 6280-12: *Stromerzeugungsaggregate – Unterbrechungsfreie Stromversorgung Teil 12; Dynamische DSV-Anlagen mit und ohne Hubkolben-Verbrennungsmotor*. Beuth Verlag, Berlin, 1996.

DIN 18709-5 (2010)

DIN 18709-5: *Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen in der Geodäsie – Teil 5: Auswertung kontinuierlicher Messreihen*. Beuth Verlag, Berlin, 2010.

DIN 31051 (2003)

DIN 31051: *Grundlagen der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 2003.

DIN 32736 (2000)

DIN 32736: *Gebäudemanagement – Begriffe und Leistungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2000.

DIN 67524-1 (2008)

DIN 67524-1: *Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 1: Allgemeine Gütemerkmale und Richtwerte*. Beuth Verlag, Berlin, 2008.

DIN EN 1325 (2011)

DIN EN 1325: *Value Management – Wörterbuch (Entwurf)*. Beuth Verlag, Berlin, 2011.

DIN EN 15643-1 (2010)

DIN EN 15643-1: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Randbedingungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2010.

DIN EN 15643-4 (2012)

DIN EN 15643-4: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität*. Beuth Verlag, Berlin, 2012.

DIN EN 60300-3-3 (2005)

DIN EN 60300-3-3: *Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 3-3: Lebenszykluskosten*. Beuth Verlag, Berlin, 2005.

DIN EN ISO 9000 (2005)

DIN EN ISO 9000: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Beuth Verlag, Berlin, 2005.

DIN EN 13201 (2004)

DIN EN 13201: *Straßenbeleuchtung – Teil 2: Güteigenschaften*. Beuth Verlag, Berlin, 2004.

DIN EN 13306 (2010)

DIN EN 13306: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Beuth Verlag, Berlin, 2010.

DIN EN ISO 14040 (2006)

DIN EN ISO 14040: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2006.

DIN PAS 1014 (2001)

DIN PAS 1014: *Vorgehensmodell für das Benchmarking von Dienstleistungen*. Beuth Verlag, Berlin, 2001.

DIN VDE 0105-100 (2009)

DIN VDE 0105-100: *Betrieb elektrischer Anlagen*. Beuth Verlag, Berlin, 2009.

DUDEN (1997)

Bibliographisches Institut: *Duden – Das Fremdwörterbuch*. Band 5, Dudenverlag, Mannheim, 1997.

DUDEN (2006)

Bibliographisches Institut: *Duden – Die deutsche Rechtschreibung*. Band 1, Dudenverlag, Mannheim, 2006.

E EBERBACH (2003)

Eberbach, K.: *Anforderungen an die Einsichtsstrecken-Leuchtdichte auf der Basis der Sichtbarkeit von Hindernissen im Tunnel*. In: Tagungsband zur LiTG-Tagung: Aktuelles zu Tunnelbeleuchtung, Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V., Berlin, 2003, S. 35-46.

ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008)

Eckey, H.-F.; Kosfeld, R.; Türck, M.: *Deskriptive Statistik*. 5. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2008.

ENGELHARDT (2014)

Engelhardt, S.: *Das Modulare Prozessmodell als Grundlage zur Gesamtkostenrechnung von Straßentunneln*. In: Nachhaltigkeit und Innovation in Baubetrieb und Tunnelbau – Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz. Verlag Dr. Hut, München, 2014, S. 551-558.

ENGELHARDT, KEUSER, SCHWARZ (2013)

Engelhardt, S.; Keuser, M.; Schwarz, J.: *Nachhaltigkeit im Tunnelbau*. In: Beton-Kalender 2014, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013, Teil I, S. 469-502.

ENGELHARDT, SCHWARZ, THEWES (2014)

Engelhardt, S.; Schwarz, J.; Thewes, M.: *Das Lebenszykluskostenkonzept zur Umsetzung der ökonomischen Nachhaltigkeit von Tunnelbauwerken*. In: Geomechanics and Tunneling, Tagungsband zum 63. Geomechanik Kolloquium Salzburg, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2014, S. 593-600.

ERMSCHEL, MÖBIUS, WENGERT (2013)

Ermschel, U.; Möbius, C.; Wengert, H.: *Investition und Finanzierung*. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2013.

F FAHRENBRUCH (2010)

Fahrenbruch, R.: *Kostenplanung nach der DIN 276 – Kosten im Bauwesen – Teil 4: Ingenieurbau (DIN 276-4:2009-08)*. Wolters Kluwer Verlag, Neuwied, 2010.

FABRYCKY, BLANCHARD (1991)

Fabrycky, W. J.; Blanchard, B. S.: *Life Cycle Cost and Economic Analysis*. Prentice-Hall Inc., New Jersey (USA), 1991.

FECK (2007)

Feck, N.: *Monte-Carlo-Simulation bei der Lebenszyklusanalyse eines Hot-Dry-Rock-Heizwerkes*. Ruhr- Universität Bochum, Dissertation, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Energiesysteme und Energiewirtschaft, Ausgabe 20, Bochum, 2007.

FGSV (1997)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen ESW (Entwurf) – Ausgabe 1997*. Arbeitsgruppe Verkehrsplanung, Arbeitsausschuss: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen, Eigenverlag, Köln, 1997.

FGSV (2006)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*. Arbeitsgruppe Verkehrsführung und Verkehrssicherheit, Eigenverlag, Köln, 2006.

FGSV (2011)

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): *Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT)*. Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, Eigenverlag, Köln, 2011.

FINKE (2005)

Finke, R.: *Grundlagen des Risikomanagements*. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005.

FISCHER, SAUER (2011)

Fischer, O.; Sauer, J.: *Ganzheitliche Bewertung der Verkehrsinfrastruktur – aktuelle Tendenzen und der Ideenwettbewerb der BaylKa*. In: Tagungsband zum 15. Münchner Massivbau Seminar, O. Fischer (Hrsg.), TU München, München, 2011, S. 55-63.

FISHMAN (1996)

Fishman, G. S.: *Monte Carlo – Concepts, Algorithms and Applications*. Springer Verlag, New-York (USA), 1996.

FLEISCHER, WAWERLA (2007)

Fleischer, J.; Wawerla, M.: *Verfügbarkeit im Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen ViLMA*. Abschlussbericht, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2007.

FMK (2006)

Finanzministerkonferenz (FMK), 2006: *Leitfaden „Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei PPP-Projekten“*. O. V., o. O., 2006.

FREIBAUER (1978)

Freibauer, B: *Bemessungsgrundlagen für die Lüftung von Straßentunneln*. In: Straßenforschung Heft 87, Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien (AUT), 1978.

FRÖHLING, SPILKER (1990)

Fröhling, O.; Spilker, D.: *Life Cycle Costing*. In: io Management Zeitschrift, 59 (1990) Nr.: 10, Verlag Industrielle Organisation BWI ETH, Zürich (CH), 1990, S. 74-78.

FRÜHWIRTH, REGLER (1983)

Frühwirth, R.; Regler, M.: *Monte-Carlo-Methoden – Eine Einführung*. BI Wissenschaftsverlag, Bibliographisches Institut, Zürich (CH), 1983.

FSV (2010)

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 09.02.32 – Tunnel – Tunnelausrüstung – Belüftung – Luftbedarfsrechnung*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2010.

FSV (2013)A

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 13.03.31 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Straßentunnel konstruktive Teile*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2013.

FSV (2013)B

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 06.02.32 – Aufwand und Kostenabschätzung*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2013.

FSV (2014)A

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 09.02.41 – Tunnel – Tunnelausrüstung – Lichttechnik – Beleuchtung*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.

FSV (2014)B

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 09.02.31 – Tunnel – Tunnelausrüstung – Belüftung – Grundlagen*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.

FSV (2014)c

Österreichische Forschungsgesellschaft Straße, Schiene Verkehr (FSV): *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS); RVS 13.03.41 – Qualitätssicherung bauliche Erhaltung – Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten – Straßentunnel – Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.

FÜRNROHR (1992)

Fürnrohr, M.: *Stochastische Modelle zur Prognose von Lebenszykluskosten komplexer Systeme*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, Neubiberg, 1992.

G GEFMA 100-1 (2004)

GEFMA – Richtlinie 100-1: *Facility Management – Grundlagen (Entwurf)*. GEFMA – Deutscher Verband für Facility Management e. V., Bonn, 2004.

GEFMA 220-1 (2006)

GEFMA – Richtlinie 220-1: *Lebenszykluskostenrechnung im FM – Einführung und Grundlagen (Entwurf)*. GEFMA – Deutscher Verband für Facility Management e. V., Bonn, 2006.

GEHLEN, MAYER, GREVE-DIERFELD (2011)

Gehlen, C.; Mayer, T. F.; Greve-Dierfeld, S.: *Lebensdauerbemessung*. In: Beton-Kalender 2011, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011, Teil I, S. 229-278.

GEHLEN, GREVE-DIERFELD (2013)

Gehlen, C.; Greve-Dierfeld, S.: *Lebensdauer von Stahlbetonbauteilen – Empfehlungen für eine modifizierte deskriptive Bemessung*. In: Beton-Kalender 2013, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013, Teil I, S. 223-270.

GEORGI (2008)

Georgii, H.-O.: *Stochastics – Introduction to Probability and Statistics*. Walter de Gruyter Verlag, Berlin, 2008.

GIRMSCHIED(2006)

Girmscheid, G.: *Risikobasiertes, probabilistisches LC-NPV-Modell – Bewertung alternativer baulicher Lösungen*. In: Bauingenieur, Band 81, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2006, S. 394-405.

GLÄSER, LAUDEL (2010)

Gläser, J.; Laudel, G.: *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse*. 4. Auflage, VS-Verlag, Wiesbaden, 2010.

GLEISSNER (2004)

Gleißner, W.: *Die Aggregation von Risiken im Kontext der Unternehmensplanung*. In: Controlling und Management Review, Heft 5/2004, Springer Verlag, Wiesbaden, 2004, S. 350-359.

GLEISSNER (2008)

Gleißner, W.: *Grundlagen des Risikomanagements*. Verlag Franz Vahlen, München, 2008.

GÖPFERT (1998)

Göpfert, J.: *Modulare Produktentwicklung – Zur Gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Dissertation, Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 1998.

GÖPFERT, STEINBRECHER (2000)

Göpfert, J.; Steinbrecher, M.: *Modulare Produktentwicklung leistet mehr*. In: Harvard Business Manager, Heft 3/2000, Manager-Magazin Verlagsgesellschaft, Hamburg, 2000, S. 20-40.

GÖTZE (2008)

Götze, U.: *Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2008.

GÖTZE, BLOECH (1993)

Götze, U.; Bloech, J.: *Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Springer Verlag, Berlin, 1993.

GRAUBNER, KNAUFF, PELKE (2011)

Graubner C.-A.; Knauff, A.; Pelke, E.: *Lebenszyklusbetrachtungen als Grundlage für die Nachhaltigkeitsbewertung von Straßenbrücken*. In: Stahlbau 80 (2011), Heft 3, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011, S. 163-171.

GRAUBNER ET AL. (2012)

Graubner C.-A.; Baumgartner, U.; Fischer, O.; Haardt, P.; Knauff, A.; Putz, A.: *Nachhaltigkeitsbewertung für die Verkehrsinfrastruktur*. In: Bauingenieur, Band 85, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2010, S. 331-340.

GREINER, MAYER, STARK (2005)

Greiner, P.; Mayer, P. E.; Stark, K.: *Baubetriebslehre – Projektmanagement*. 3. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2005.

GROB (2006)

Grob, H. L.: *Einführung in die Investitionsrechnung*. 5. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2006.

GÜNTHER, KRIEGBAUM (1997)

Günther, T.; Kriegbaum, C.: *Life Cycle Costing*. In: wisu - Das Wirtschaftsstudium. Lange Verlag, Düsseldorf, 1997, S. 900 – 912.

GUPTA ET AL. (2005)

Gupta, H. V.; Beven, K. J.; Wagener, T.: *Model Calibration and Uncertainty Estimation*. In: Encyclopedia of Hydrological Sciences, Part 3, Editor in Chief Anderson, M. G., Wiley Verlag, Chichester (UK), 2005, S. 2015-2031.

H HAACK (2011)

Haack, A.: *Einführung und Zielsetzung*. In: Tunnel, Sonderausgabe Sachstandsbericht 2011 „Sanierung von Eisenbahntunneln“. Bauverlag, Gütersloh, 2011, S. 7-11.

HAARDT (2002)

Haardt, P.: *Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufe 1 und 2*. Schlussbericht zu AP-Projekt 99 245, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2002.

HÄDER (2009)

Häder, M.: *Delphi-Befragung*. 2. Auflage, VS-Verlag, Wiesbaden, 2009.

HAERTER (1961)

Haerter, A.: *Theoretische und experimentelle Untersuchungen über die Lüftungsanlagen von Straßentunneln*. Dissertationsdruckerei Leemann, Zürich (CH), 1961.

HANUSCH (1994)

Hanusch, H.: *Nutzen-Kosten-Analyse*. 2. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 1994.

HANUSCH, KUHN, GREINER (2005)

Hanusch, H.; Kuhn, T.; Greiner, A.: *Arbeitsbuch der Volkswirtschaftslehre 1*. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2005

HARDKOP (2010)

Hardkop, G.: *Methodenentwicklung zur Spezifizierung der kalkulatorischen Lebensdaueransätze gebäudetechnischer Komponenten*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2010.

HASENAUER, STROHMEIER, MAK (1983)

Hasenauer, R.; Strohmeier, E.; Mak, O.: *Optimierung von Straßentunnelprojekten hinsichtlich Bau- und Betriebskosten*. Forschungsbericht, Heft 217, Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien (AUT), 1983.

HAUG (2013)

Haug, E.: *LED-Grundlagen*. <http://www.led-treiber.de/>, 2013, abgerufen am 04.08.2014.

HEINRICH (1994)

Heinrich, L. J.: *Systemplanung – Planung und Realisierung von Informations- und Kommunikationssystemen; Band 2 – Der Prozess der Grobprojektierung, der Feinprojektierung und der Installation*. 5. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 1994.

HELLERFORTH (2006)

Hellerforth, M.: *Handbuch Facility Management für Immobilienunternehmen*. Springer Verlag, Berlin, 2006.

HENGARTNER, THEODORESCU (1978)

Hengartner, W.; Theodorescu, R.: *Einführung in die Monte-Carlo-Methode*. Hanser Verlag, München, 1978.

HENNIG (2012)

Hennig, W.: *VDE-Prüfung nach BetrSichV, TRBS und BGV A3*. 10. Auflage, VDE Verlag, Berlin, 2012.

HENKING (1998)

Henking, A.: *Risikoanalyse unter Berücksichtigung stochastischer Abhängigkeiten*. Technische Universität Dresden, Dissertation, Utz Verlag, München, 1998.

HENZE (2010)

Henze, N.: *Stochastik für Einsteiger*. 8. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2010.

HERZKE (1972)

Herzke, K.: *Der Einfluss des Kraftfahrzeugverkehrs auf die Betriebskosten von Tunnellüftungen*. In: Bauingenieur-Praxis, Heft 82, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1972.

HERZOG (2005)

Herzog, K.: *Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Darmstadt, 2005.

HILDENBRAND (1988)

Hildenbrand, K.: *Systemorientierte Risikoanalyse in der Investitionsplanung*. Universität Hohenheim, Dissertation, Dunker & Humblot, Berlin, 1988.

HILL (2012)

Hill, P. J.: *Simulative Risikoanalyse von Biomethanprojekten – Ein operativer Ansatz zur Implementierung simulativer Risikoanalysen in das Risikomanagementsystem von Investoren eines Biomethanprojektes*. Universität Kassel, Dissertation, Kassel, 2012.

HILLEMEIER ET AL. (2011)

Hillemeier, B.; Flohrer C.; Krell, J.; Marquardt, G.; Orłowsky, J.; Raupach, M.; Schubert, K.; Schuler, S.: *Instandsetzung und Erhaltung von Betonbauwerken*. In: Beton-Kalender 2011, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011, Teil I, S. 279-410.

HOAI (2013)

HOAI: *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen* (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI). In der Fassung vom 10.07.2013, in Kraft getreten am 17.07.2013. Quelle: http://www.hoai.de/online/HOAI_2013/HOAI_2013.php, abgerufen am 18.01.2014.

HOFFMANN (2011)

Hoffmann, M.: *Introduction of the Life Cycle Costing Factor of Road Infrastructures for the Optimization of Budgeting and Investment Decisions*. In: Proceedings of the 7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology (ICPT), Bangkok (TH), 2011.

HOFFMEISTER (2008)

Hoffmeister, W.: *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse*. Berliner Wissenschafts-Verlag, Berlin, 2008.

HOLST (2005)

Holst, R.: *Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufe 3*. Schlussbericht zu AP-Projekt 02 244/BV, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, 2005.

HOLST (2012)A

Holst, J.: *Optimization of Operation and Maintenance Activities and Costs for Road Tunnels based on experience*. In: Proceedings of the UNDER CITY Colloquium on Using Underground Space in Urban Areas in South East Europe, Dubrovnik (HR), 2012.

HOLST (2012)B

Holst, J.: *Optimization of Operation and Maintenance Activities and Costs for Road Tunnels based on experience*. In: Proceedings of the First Eastern European Tunnelling Conference, Budapest (HUN), 2012.

HOPFERWIESER (1977)

Hopferwieser, W.: *Beleuchtung von Straßentunneln*. In Straßenforschung Heft 85, Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien (AUT), 1977.

HSV (2006)

Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung (HSV): *Wirtschaftliche Aspekte bei Tunnelbauwerken in frühen Planungsphasen*. Hessische Straßen- und Verkehrsverwaltung, Wiesbaden, 2006.

I INGBW (2013)

Ingenieurkammer Baden-Württemberg (INGBW): *Angemessene Stundensätze im Ingenieurbüro*. Merkblatt 075, Eigenverlag, Stuttgart, 2013.

INTRA (2000)

Intra, C.: *Effiziente Produktionsplanung durch vereinfachte Ablaufsimulation*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2000.

ISAKSSON (2002)

Isaksson, T.: *Model for Estimation of Time and Cost based on Risk Evaluation applied on Tunnel Projects*. Royal Institute of Technology Stockholm, Dissertation, Stockholm (SE), 2002.

ISO/FDIS 15686-5 (2008)

ISO/FDIS 15686-5: *Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 5: Life-cycle costing*. International Organization for Standardization, ISO Copyright Office, Genf (CH), 2008.

J JÖCKEL, PFLAUMER (1981)

Jöckel, K.-H.; Pflaumer, P.: *Stochastische Investitionsrechnung: Ein analytisches Verfahren zur Risikoanalyse*. In: Zeitschrift für Operations Research, Band 25, Physica-Verlag, Würzburg, 1981, S. B39-B47.

JODL (2010)

Jodl, H. G.: *Lebenszykluskosten von Brücken – Teil 1 – Berechnungsmodell LZKB*. In: Bauingenieur, Band 85, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2010, S. 221-230.

JULICH (2010)

Julich, S.: *Unsicherheiten in der Modellierung des Wasser- und Stickstoffhaushaltes von Flusseinzugsgebieten der Mikro- und Mesoskala*. Justus-Liebig-Universität Gießen, Dissertation, Gießen, 2010.

K KALUSCHE (2008)

Kalusche, W.: *Lebenszykluskosten von Gebäuden - Grundlage ist die neue DIN 18960:2008-02 – Nutzungskosten im Hochbau*. In: Bauingenieur, Band 83, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2008, S. 495-501.

KAMARIANAKIS (2013)

Kamarianakis, S.: *Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur*. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, Bochum, 2013.

KAMARIANAKIS, ADDEN, THEWES (2013)

Kamarianakis, S.; Adden, H.; Thewes, M.: *Einsatz eines Decision Analysis Modells zur Unterstützung des Planungsprozesses für den Bau unterirdischer Infrastrukturen*. In: Katalog zur Wasser Berlin International 2013, No Dig Berlin 2013, Neureuther Fair Media GmbH, Essen, 2013, S. 157-172.

KARLÖF, ÖSTBLOM (1994)

Karlöf, B.; Östblom, S.: *Das Benchmarking Konzept*. Verlag Franz Vahlen, München, 1994.

KEFER (2013)

Kefer, V.: *Erfolgsfaktoren für große Infrastrukturprojekte – Erfahrungen der Deutschen Bahn aus dem Projekt Stuttgart-Ulm*. In: Forschung + Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen, STUVA Tagung 2013, Bauverlag, Gütersloh, 2013, S. 17-23.

KELLER (1996)

Keller, T.: *Benchmarking – Methoden und Techniken*. Univation Verlag, Chemnitz, 1996.

KOHLBECKER (2010)

Kohlbecker, F.: *„Projektbegleitendes Öko-Controlling“ – Ein Beitrag zur ausgewogenen Bauprojektrealisierung beispielhaft dargestellt anhand von Tunnelbauprojekten*. Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, Karlsruhe 2010.

KREIKENBAUM (2004)

Kreikenbaum, S.: *Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung*. In: gwa – Organ der SVGW und des VSA, Schweizerischer Verein des Gas- und Wasserfaches, Zürich (CH), 2004, S. 587-594.

KUHLMANN ET AL. (2011)

Kuhlmann, U.; Beck, T.; Fischer, M.; Friedrich, H.; Kaschner, R.; Maier, P.; Mensinger, M.; Pfaffinger, M.; Sedlbauer, K.; Ummenhofer, T.; Zinke, T.: *Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit*. In: Stahlbau 80 (2011), Heft 10, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011, S. 703–710.

L LEIMBÖCK, KLAUS, HÖLKERMANN (2011)

Leimböck, E.; Klaus, U. R.; Hölckermann, O.: *Baukalkulation und Projektcontrolling – unter Berücksichtigung der KLR Bau und der VOB*. Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.

LIEBOLD, TRINCZEK (2009)

Liebold, R.; Trinczek, R.: *Experteninterview*. In: Handbuch Methoden der Organisationsforschung. VS Verlag, Wiesbaden, 2009, S. 32-56.

LIENAU (2006)

Lienau, C.: *Abbildung von Infrastrukturkosten in der Eisenbahnbetriebssimulation*. Universität Hannover, Dissertation, Hannover, 2006.

LISSON (2014)

Lisson, M.: *Ganzheitliche Projektbewertung – Entwicklung eines Modells zur Nachhaltigkeitsbewertung von Hochwasserschutzmaßnahmen – Umsetzung in Planung und Projektentscheidung*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, Neubiberg, 2014.

LIPPE (1993)

von der Lippe, C.: *Deskriptive Statistik*. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 1993.

LOHAUS ET AL. (2011)

Lohaus, L.; Petersen, L.; Griese, R.; Anders, S.: *Beton im Kraftwerksbau*. In: Beton-Kalender 2011, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2011, Teil I, S. 434-538.

LUHMANN (1991)

Luhmann, N.: *Soziale Systeme – Grundriss einer allgemeinen Theorie*. 4. Auflage. Suhrkamp Verlag, Frankfurt a. M., 1991.

M MAIDL (1994)

Maidl, B.: *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus – Band I: Konstruktionen und Verfahren*. 2. Auflage, Verlag Glückauf, Essen, 1994.

MAIDL (1995)

Maidl, B.: *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus – Band II: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung*. 2. Auflage, Verlag Glückauf, Essen, 1995.

MAIDL, THEWES, MAIDL (2014)A

Maidl, B.; Thewes, M.; Maidl, U.: *Handbook of Tunnel Engineering – Volume I – Structures and Methods*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2014.

MAIDL, THEWES, MAIDL (2014)B

Maidl, B.; Thewes, M.; Maidl, U.: *Handbook of Tunnel Engineering – Volume II – Basics and Additional Services for Design and Construction*. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2014.

MAIER (2007)

Maier, K. M.: *Risikomanagement im Immobilien- und Finanzwesen - Ein Leitfaden für Theorie und Praxis*. 3. Auflage, Verlag Knapp Fritz GmbH, Frankfurt a. M., 2007.

MARNY (2012)

Marny, S.: *Betriebs- und Unterhaltungskosten von Tunnelbauwerken – Aufstellung einer Kostenstruktur für die Nutzungskosten von Straßentunneln unter Berücksichtigung einer systematischen Aufgliederung und Differenzierung der Kosten hinsichtlich ihrer Entstehung*. Masterarbeit am Institut für Baubetrieb, Universität der Bundeswehr München, nicht veröffentlicht, München, 2012.

MCKINSEY (2008)

McKinsey & Company: *Potenziale der öffentlichen Beschaffung für ökologische Industriepolitik und Klimaschutz*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Produkte_und_Umwelt/mckinseystudie.pdf, abgerufen am 15.12.2014.

MEGILL (1977)

Megill, R. E.: *An Introduction to Risk Analysis*. Petroleum Publishing Company, Tulsa (USA), 1977.

MERTINS, SIEBERT (1997)

Mertins, K.; Siebert, G.: *Prozessorientiertes Benchmarking – Vorgehensweise für die Durchführung effektiver Benchmarking-Projekte*. In: *Benchmarking – Der Weg zu Best Practise*, Springer Verlag, Berlin, 1997.

MERTINS, SIEBERT, KEMPF (1995)

Mertins, K.; Siebert, G.; Kempf, S.: *Benchmarking – Praxis in deutschen Unternehmen*. Springer Verlag, Berlin, 1995.

METROPOLIS, ULAM (1949)

Metropolis, N.; Ulam, S.: *The Monte Carlo Method*. In: *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 44, No. 247, o. O., 1949, pp. 335-341.

MEUSER, NAGEL (2009)

Meuser, M.; Nagel, U.: *Das Experteninterview – konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage*. In: *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft*, VS-Verlag, Wiesbaden, 2009, S. 465-479.

MEYER (1976)

Meyer, C.: *Kennzahlen und Kennzahlen-Systeme*. Poeschel Verlag, Stuttgart, 1976.

MEYER (1996)

Meyer, J.: *Benchmarking – Spitzenleistungen durch Lernen von den Besten*. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1996.

MEYER, WARNER (1997)

Meyer, S.; Warner, A.: *Organisationsgestaltung*. In: *Organisation des Produktionsprozesses*. Hrsg. Nedeß, C., B. G. Teubner, Stuttgart, 1997.

MICROSOFT (O. A.)

Microsoft Corporation: *Description of the RAND function in Excel*. <http://support.microsoft.com/kb/828795/en-us>, o. A., abgerufen am 30.09.2013.

MJV (2007)

Ministerium der Justiz und für Verbraucherschutz des Landes Rheinland-Pfalz (MJV): *Landesverordnung über Prüfsachverständige für Standsicherheit (PrüfSStBauVO)*.
<http://landesrecht.rlp.de/jportal/portal/t/xut/page/bsrlpprod.psml;jsessionid=3F0E64F822CB23017B10F17EA54B7514.jp24?doc.hl=1&doc.id=jlr-Pr%C3%BCfSachvVRPV3P3%3Ajuris-Ir00&documentnumber=9&numberofresults=10&showdoccase=1&doc.part=X¶mfromHL=true#jlr-Pr%C3%BCfSachvVRPrahmen>, 2007, abgerufen am 30.10.2014.

MÖLLER, KALUSCHE (2013)

Möller, D.-A.; Kalusche, W.: *Planungs- und Bauökonomie*. 6. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2013.

MOSLER, SCHMID (2006)

Mosler, K.; Schmid, F.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik*. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.

MÜHLENKAMP (1994)

Mühlenkamp, H.: *Kosten-Nutzen-Analyse*. Oldenbourg Verlag, München, 1994.

MÜLLER-GRONBACH, NOVAK, RITTER (2012)

Müller-Gronbach, T.; Novak, E.; Ritter, K.: *Monte Carlo-Algorithmen*. Springer Verlag, Heidelberg, 2012.

MULAG (2012)

Mulag Fahrzeuge Heinz Wössner GmbH u. Co. KG: *Innovative Gerätetechnik für die Tunnelunterhaltung: Tunnelwaschgerät TWG 600 L*.
http://www.mulag.de/fileadmin/content/media/02_strassenunterhaltung/spezialfahrzeuge/twg600l/mulag_twg600l_dok0412_353.pdf, abgerufen am 31.07.2014.

MUVEDA, AVISO (2011)

Muveda Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR; AVISO GmbH: *Bewertungsverfahren zur Aufstellung des 7. Ausbauplans für die Staatsstraßen in Bayern; Teil: Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)*. Im Auftrag der Obersten Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, Aachen, 2011.

N NAUMANN (1951)

Naumann, E.; Otzen R.: *Straßentunnel und ihre Ausrüstung*. In: Der Neuzeitliche Straßenbau. Handbibliothek für Bauingenieure, Volume 10, Springer Verlag, 1951, S. 414-431 (Reprint).

NAUMANN (2007)

Naumann, R.: *Kosten-Risiko-Analyse für Verkehrsinfrastrukturprojekte*. Technische Universität Dresden, Dissertation, Expert Verlag, Renningen, 2007.

NAUMANN, FRIEBEL (2000)

Naumann, J.; Friebel, W.-D.: *Straßentunnel in Deutschland – Von der Planung bis zur Erhaltung*. In: Bautechnik 77 (2000), Heft 11, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2000, S. 810-819.

NÖLL, WIEDEMANN (2008)

Nöll, B.; Wiedemann, A.: *Investitionsrechnung unter Unsicherheit*. Verlag Franz Vahlen, München, 2008.

O ÖBGL (2009)

ÖBGL: *Österreichische Baugeräteliste 2009 – Technisch-wirtschaftliche Baumaschinen-daten*. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2009.

ÖBV (2012)

Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): *Innenschalenbeton – Richtlinie*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2012.

ÖBV (2014)A

Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): *Tunnelbeschichtung – Merkblatt*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.

ÖBV (2014)B

Österreichische Bautechnik Vereinigung (ÖBV): *Erhaltung und Instandsetzung von Bau-ten aus Beton und Stahlbeton – Richtlinie*. Eigenverlag, Wien (AUT), 2014.

OEHMICHEN (2008)

Oehmichen D. S.: *Mechanismen der Hydrophobierung zementgebundener Werkstoffe mit siliciumorganischen Verbindungen*. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, Karlsruhe, 2008.

ÖNORM B 2110 (2013)

ÖNORM B 2110: *Allgemeine Vertragsbestimmungen für Bauleistungen – Werkvertrags-norm*. Österreichisches Institut für Normung, Wien (AUT), 2013.

OSSADNIK (2008)

Ossadnik, W.: *Kosten- und Leistungsrechnung*. Springer Verlag, Berlin, 2008.

OSSADNIK (2009)

Ossadnik, W.: *Controlling*. 4. Auflage, Oldenbourg Verlag, München, 2009.

OTT (2011)

Ott, S.: *Investitionsrechnung in der öffentlichen Verwaltung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.

P PAETZ (2011)

Paetz, N.-V.; Ceylan, F.; Fiehn, J.; Schworm, S; Harteis, C.: *Kompetenz in der Hoch-schuldidaktik, Ergebnisse einer Delphi-Studie über die Zukunft der Hochschullehre*. VS-Verlag, Wiesbaden, 2011.

PAPULA (2011)

Papula, L.: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. Band 3, 6. Auflage, Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.

PARKER, REILLY, 2009

Parker, H.; Reilly, J.: *Life Cycle Cost Considerations Using Risk Management Tech-niques*. In: Proceedings of the World Tunneling Congress (WTC), Budapest, 2009.

PELZETER (2006)

Pelzeter, A.: *Lebenszykluskosten von Immobilien*. European Business School, Dissertati-on, Verlag Rudolf Müller, Köln, 2006.

PFOHL, WÜBBENHORST (1982)

Pfohl, H.-C.; Wübbenhorst K. L.: *Zum Konzept der Lebenszykluskosten*. Veröffentlichung des Fachgebietes Unternehmensführung Nr. 1, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 1982.

PFRÜNDNER (2010)

Pfründner, U.: *Empiriegestützte, lebenszyklusorientierte Instandhaltungsstrategien für Immobilien der öffentlichen Hand*. Technische Hochschule Karlsruhe, Dissertation, Karlsruhe, 2010.

PIARC (1999)

World Road Association (PIARC): *Reduction of Operational Cost of Road Tunnels – Report and Recommendations*. World Road Association, La Défense Cedex (FRA), 1999.

PIARC (2005)

World Road Association (PIARC): *Good Practice for the Operation and Maintenance of Road Tunnels*. World Road Association, La Défense Cedex (FRA), 2005.

PIARC (2008)

World Road Association (PIARC): *Urban Road Tunnels – Recommendations to Managers and operating Bodies for Design, Management, Operation and Maintenance*. World Road Association, La Défense Cedex (FRA), 2008.

PIARC (2012)A

World Road Association (PIARC): *Recommendations on Management of Maintenance and technical Inspections of Road Tunnels*. World Road Association, La Défense Cedex (FRA), 2012.

PIARC (2012)B

World Road Association (PIARC): *Life-Cycle Aspects of electrical Road Tunnel Equipment*. World Road Association, La Défense Cedex (FRA), 2012.

PINDYCK, RUBINFELD (2009)

Pindyck, R. S.; Rubinfeld, D. L.: *Mikroökonomie*. Pearson Studium, München, 2009.

POGGENSEE (2011)

Poggensee, K.: *Investitionsrechnung, Grundlagen – Aufgaben – Lösungen*. 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2011.

POKORNY, WEISS, KRÖNKE (1981)

Pokorny, W.; Weiss, H.-H.; Krönke, I.: *Theoretische und praktische Untersuchungen zur Lüftung von Straßentunneln*. In: *Straßenforschung* Heft 171, Bundesministerium für Bauten und Technik, Wien (AT), 1981.

POPP (2013)

Popp, T.: *Instandhaltungsintervalle und -kosten von Straßenbrücken – Entwicklung eines Excel-Lebenszykluskosten-Kalkulations-Tools*. TU Bergakademie Freiberg, Dissertation, Verlag Dr. Kovač, Hamburg, 2013.

R RAUH, BERENZ, HEISSENHUBER (2007)

Rauh, S.; Berenz, S.; Heißenhuber, A.: *Abschätzung des Unternehmerischen Risikos beim Betrieb einer Biogasanlage mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode*. Veröffentlichung im Rahmen der Konferenz der GEWISOLA und ÖGA, Freising, 2007.

RAUPACH, ORLOWSKY (2008)

Raupach, M.; Orłowski, J.: *Erhaltung von Betonbauwerken*. Vieweg-Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.

RECKTENWALD (1983)

Recktenwald, H. C.: *Lexikon der Staats- und Geldwirtschaft*. Verlag Franz Vahlen, München, 1983.

REFSGAARD ET AL. (2005)

Refsgaard, J. C.; van der Sluijs, J. P.; Brown, J.; van der Keur, P.: *A framework for dealing with uncertainty due to model structure error*. In: *Advances in Water Resources* 29 (2006), Elsevier, Amsterdam (NL), 2006, S. 1586-1597.

REILLY, PARKER (2007)

Reilly, J.; Parker, H.: *Benefits and life-cycle costs of underground projects*. In: *Proceedings of the World Tunneling Congress (WTC)*, Prague, Taylor & Francis Group, London (UK), 2007.

REISBECK, SCHÖNE (2009)

Reisbeck, T.; Schöne, L. B.: *Immobilien-Benchmarking*. 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2009.

RIEGEL (2004)

Riegel, W.: *Ein softwaregestütztes Berechnungsverfahren zur Prognose und Beurteilung der Nutzungskosten von Bürogebäuden*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Darmstadt, 2004.

RIESS, BRANDT (1999)

Riess, I.; Brandt, R.: *Die Auslegung von Tunnellüftungen für den Normalbetrieb*. In: *Tunnel – Internationale Fachzeitschrift für unterirdisches Bauen*, Heft 5, Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh, 1999, S. 38-42.

RIESTE (2014)

Rieste Illumination: *Vergleich Vorschaltgerät KVG, VVG und EVG für energieeffizienten Betrieb*. <http://www.rieste.at/Lichtplanung/vergleich-kvgvvgvg.html>, 2014, abgerufen am 04.08.2014.

RINGWALD, RÖNITZSCH, RIEDEL (2013)

Ringwald, R.; Rönitzsch, H.; Riedel, M.: *Praxishandbuch Öffentliche Beleuchtung – Wirtschaftlichkeit, Recht, Technik*. Beuth Verlag, Berlin, 2013.

ROSTAM, HØJ (2004)

Rostam, S.; Høj, N. P.: *Integrated tunnel design from cradle to grave – Enhancing structural performance and owner confidence*. Online Ausgabe: <http://www.ita-aites.org/fileadmin/filemounts/ovion/doc/safety/prague/SR%26Hoj.pdf>, abgerufen am 30.10.2012.

RUDLOFF (2010)

Rudloff, R.: *Modul- und Prozessmodell zur Lebenszyklusrenditeberechnung eines Bauwerkes*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, Verlag Dr. Hut, München, 2010.

S SABISCH, TINTELNOT (1997)

Sabisch, H.; Tintelnot, C.: *Integriertes Benchmarking für Produkte und Produktentwicklungsprozesse*. Springer Verlag, Berlin, 1997.

SANDER (2012)

Sander, P.: *Probabilistische Risiko-Analyse für Bauprojekte – Entwicklung eines branchenorientierten softwaregestützten Risiko-Analyse-Systems*. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Dissertation, Innsbruck (AUT), 2012.

SANDOVAL-WONG (2012)

Sandoval-Wong, J. A.: *Development of a risk based decision analysis system for project management in construction projects*. Universität der Bundeswehr München, Dissertation, Verlag Dr. Hut, München, 2012.

SAUER, ET AL. (2012)

Sauer, J.; Xalter, S.; Fischer, O.; Freudenstein, S.: *A holistic life-cycle approach for traffic infrastructure*. In: Tagungsband Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, Taylor Francis Group, London (UK), 2012, S. 966–970.

SAUER, FISCHER (2013)

Sauer, J.; Fischer, O.: *Sustainability considerations for tunnel projects*. In: Research and Applications in Structural Engineering, Mechanics & Computation: Proceedings of the Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics & Computation, Cape Town (ZAF), 2013, S. 883-884.

SCHACH ET AL. (2006)

Schach, R.; Otto, J.; Häupel, H.; Fritzsche, M.: *Lebenszykluskosten von Brückenbauwerken*. In: Bauingenieur, Band 81, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2006, S. 343-350.

SCHACH, JEHLE, NAUMANN (2006)

Schach, R.; Jehle, P.; Naumann, R.: *Transrapid und Rad-Schiene-Hochgeschwindigkeitsbahn – Ein gesamtheitlicher Systemvergleich*. Springer Verlag, Berlin, 2006.

SCHINDEL (1977)

Schindel, V.: *Risikoanalyse*. Verlag V. Florentz GmbH, München 1977.

SCHMALENBACH (1963)

Schmalenbach, E.: *Kostenrechnung und Preispolitik*. 8. Auflage, Westdeutscher Verlag, Köln/Opladen, 1963.

SCHNEEWEISS (1969)

Schneeweiss, H.: *Monte-Carlo-Methoden*. In: Beiträge zur Unternehmensforschung, Physica Verlag, Würzburg, 1969, S. 129-152.

SCHRÖDER (2003)

Schröder, J.: *Benchmarking von Entwicklungsbereichen im Maschinenbau*. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Dissertation, Aachen, 2003.

SCHUB, STARK (1985)

Schub, A.; Stark, K.: *Life Cycle Cost von Bauobjekten – Methoden zur Planung von Erst- und Folgekosten*. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1985.

SCHWARZ, ENGELHARDT (2012)

Schwarz, J.; Engelhardt, S.: *Tunnel als Ingenieurbauwerke und technische Anlagen – Tunnelbauwerke und ihre Nutzungskosten*. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser. Universität der Bundeswehr München, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Neubiberg, 2012, S. 243-253.

SCHWARZ, ENGELHARDT (2013)

Schwarz, J.; Engelhardt, S.: *Nachhaltige Infrastrukturbauwerke*. In: Kolloquienreihe Innovation und Nachhaltigkeit 2013, Schriftenreihe der Universität der Bundeswehr München, Band 02, Neubiberg, 2013, S. 11-18.

SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER (2012)

Schwarz, J.; Engelhardt, S.; Keuser, M.: *Life cycle costs of tunnels*. IALCCE 2012 - Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Wien; In: Tagungsband Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, Taylor Francis Group, London (UK), 2012, S. 1018-1024.

SCHWARZ, ENGELHARDT, KEUSER (2013)

Schwarz, J.; Engelhardt, S.; Keuser, M.: *Lebenszykluskostenrechnung von Tunnelbauwerken*. In: Festschrift Konrad Bergmeister – Lebensdauer von Bauwerken, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2013, S. 271-283.

SCHWARZ ET AL. (2013)

Schwarz, J.; Engelhardt, S.; Thewes, M.; Adden, H.; Vogt, P.: *Konzept zur nachhaltigen Betrachtung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken*. In: Vorträge zum Deutschen Bautechnik-Tag 2011, Heftreihe DBV, Band 23, Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., Berlin, 2013, S. 115-116.

SCHWARZ, SANDOVAL-WONG, SÁNCHEZ (2011)

Schwarz, J.; Sandoval-Wong, A. J.; Sánchez, P. M.: *Implementation of artificial intelligence into risk management decision-making processes in construction projects*. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Schach, Technische Universität Dresden, Dresden, 2011, S. 357-378.

SCHWEIBENZ, CLAUSEN (2010)

Schweibenz, B.; Clausen T.: *Der Public Sector Comparator bei PPP-Projekten im Straßenbau*. In: Erfolgreich bauen – Beiträge aus Baurecht, Baubetriebswesen und Baupraxis, Festschrift für Prof. Dr.-Ing. Gerhard Iwan zum 60. Geburtstag, Hannover, 2010, S. 99-124.

SEILHEIMER (2007)

Seilheimer, S.: *Immobilien-Portfoliomanagement für die öffentliche Hand*. Deutscher Universitäts-Verlag, Wiesbaden, 2007.

SHERIF, KOLARIK (1981)

Sherif, Y. S., Kolarik, W. J.: *Life Cycle Costing: Concept and Practice*. In: OMEGA - The International Journal of Management Science, Vol. 9, No. 3, Pergamon Press Ltd., Oxford (UK), 1981, S. 287-296.

SIEBERT (1998)

Siebert, G.: *Prozeß-Benchmarking Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen*. Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IBK), Berlin, 1988.

SIEBERT, KEMPF (2008)

Siebert, G.; Kempf, S.: *Benchmarking: Leitfaden für die Praxis*. Carl Hanser Verlag, München, 2008.

SIEGWART (1998)

Siegwart, H.: *Kennzahlen für die Unternehmensführung*. Verlag Paul Haupt, Bern (CH), 1998.

SIMON (1962)

Simon, H. A.: *The Architecture of Complexity*. In Proceedings of the American Philosophical Society, Vo. 106, No. 6, 1962, S. 467-482, <http://www.cs.brandeis.edu/~cs146a/handouts/papers/simon-complexity.pdf>, abgerufen am: 18.02.2014.

SISTENICH ET AL. (2012)

Sistenich, C.; Zulauf, C.; Imhof, D.; Mayer, G.; Zimmermann, U.; Klein, A.: *Sicherheitsniveau und Lebenszykluskosten von Einhausungen bei Bundesfernstraßen*. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2012. VGE-Verlag, Essen, 2012, S. 185-202.

SOBOL (1991)

Sobol, I. M.: *Die Monte-Carlo-Methode*. Deutscher Verlag der Wissenschaft, Berlin, 1991.

STACHOWIAK (1973)

Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Springer Verlag, Wien (AUT), 1973.

STACHOWIAK (1983)

Stachowiak, H.: *Modelle, Konstruktion der Wirklichkeit*. Fink Verlag, München, 1983.

STARK (1985)

Stark, K.: *Life Cycle Cost von Bauobjekten, dargestellt an einem praktischen Beispiel*. In: Symposium Life Cycle Cost; Gesellschaft für Projektmanagement INTERNET Deutschland e. V., München, 1985.

STAUDT ET AL. (1985)

Staudt, E.; Groeters, U.; Hafkesbrink, J.; Treichel, H.-R.: *Kennzahlen und Kennzahlensysteme*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1985.

STEIGER (2009)

Steiger, M.: *IT-gestütztes Risikomanagementmodell für Tunnelbauprojekte mit Hilfe von Bayes'schen Netzen und Monte-Carlo-Simulationen*. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich; Dissertation, Zürich (CH), 2009.

STELAND (2013)

Steland, A.: *Basiswissen Statistik*. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2013.

STICHNOTH (2010)

Stichnoth, P.: *Entwicklung von Handlungsempfehlungen und Arbeitsmitteln für die Kalkulation betriebsphasenspezifischer Leistungen im Rahmen von PPP-Projekten im Schulbau*. Universität Kassel, Dissertation, Kassel, 2010.

STMI (2006)

Bayerisches Staatsministerium des Inneren, Bau und Verkehr (STMI): *Bayerische Bauordnung (BayBO)*. In der Fassung der Bekanntmachung vom 4. August 1997, geändert am 10.03.2006, http://www.stmi.bayern.de/assets/stmi/buw/baurechtundtechnik/baybo_1998.pdf, abgerufen am 05.03.2014.

STURM, BACHER (2008)

Sturm, P.; Bacher, M.: *Belüftung von Straßentunneln – Anforderungen von Richtlinien vs. Umsetzbarkeit in Projekten*. In: VDI Berichte 2019: Tunnel und andere unterirdische Verkehrsanlagen, VDI Verlag, Düsseldorf, 2008, S. 49-61.

STUVA (1997)

Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA): *Straßenquerschnitte in Tunneln – Ermittlung der Tunnelbaukosten – Kurzfassung*. Forschungsbericht, Eigenverlag, Köln, 1997.

T TATHOFF, NEUSS (2002)

Tathoff, H.; Neuß, H.: *Kosten der Bauwerksinstandhaltung*. In: Handbuch der Brückeninstandhaltung, Hrsg.: Vollrath, F.; Tathoff, H., 2. Auflage, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2002.

THEIS, KERNBICHLER (2002)

Theis, C.; Kernbichler, W.: *Grundlagen der Monte Carlo Methoden*. Technische Universität Graz (AUT), 2002, <http://itp.tugraz.at/MML/MonteCarlo/MCIntro.pdf>, abgerufen am 10.04.2013.

THEWES, ADDEN (2013)

Thewes, M.; Adden, H.: *Grundlagen der Investitionsrechnung*. Vorlesungsunterlagen Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, WS 13/14, Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2013.

THEWES, BIELECKI (2009)

Thewes, M.; Bielecki, R.: *Life cycle costing as a decision-making aid to the planning of underground infrastructure*. In: Proceedings of the World Tunneling Congress (WTC), Budapest (HUN), 2009.

THEWES ET AL. (2013)A

Thewes, M.; Schwarz, J.; Engelhardt, S.; Vogt, P.: *Lebenszykluskostenanalyse als Ansatz für die ökonomische Optimierung von Tunnelbauwerken*. In: Forschung + Praxis, U-Verkehr und unterirdisches Bauen, STUVA-Tagung 2013, Bauverlag, Gütersloh, 2013, S. 241-246.

THEWES ET AL. (2013)B

Thewes, M.; Vollmann, G.; Kamarianakis, S.; Sparkel, D.; Hoffman, T.: *Entscheidungsmodelle bei der Ausstattung von Tunneln mit sicherheitstechnischen Anlagen – Teil 1: Rahmenbedingungen bei Verkehrstunneln*. In: Tunnel, Ausgabe 8/2013, Bauverlag, Gütersloh, 2013, S. 38-47.

THEWES ET AL. (2014)

Thewes, M.; Vollmann, G.; Kamarianakis, S.; Sparkel, D.; Hoffman, T.: *Entscheidungsmodelle bei der Ausstattung von Tunneln mit sicherheitstechnischen Anlagen – Teil 2: Bewertung zweier Ausstattungsvarianten mithilfe eines integrierten Entscheidungsmodells*. In: Tunnel, Ausgabe 1/2014, Bauverlag, Gütersloh, 2014, S. 17-27.

THEWES, KAMARIANAKIS (2014)

Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Ein fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell zur Unterstützung der Planung von unterirdischer Infrastruktur*. In: Nachhaltigkeit und Innovation in Baubetrieb und Tunnelbau – Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz, Dr. Hut Verlag, München, 2014, S. 507-523.

THEWES, VOGT (2010)

Thewes, M.; Vogt, P.: *Die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Ausgangsbasis zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Bauplanungs- und Betriebskonzepten*. In: Tagungsband 2. Forschungssymposium der Baubetriebs- und Immobilienwissenschaften, agenda 4, München, 2010, S. 317-337.

THEWES, VOGT (2011)

Thewes, M.; Vogt, P.: *The Life-Cycle Philosophy of Underground Traffic Infrastructure – Approaches for a Sustainable Accounting and the Visualization of Costs*. In: Proceedings of International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology. Kuala Lumpur (MAL), 2011 S. 129-138.

THEWES, VOGT (2014)

Thewes, M.; Vogt, P.: *Modellentwicklung für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln*. In: Bauingenieur, Band 89, Springer VDI Verlag, Düsseldorf, 2014, S. 421-430.

TIMM (2008)

Timm, T.: *Ein Verfahren zur hierarchischen Struktur-, Dimensions- und Materialbedarfsplanung von Fertigungssystemen*. Universität Paderborn, Dissertation, Paderborn, 2008.

TÖPFER, MANN (1997)

Töpfer, A.; Mann, A.: *Benchmarking: Lernen von den Besten*. In: Benchmarking – Der Weg zu Best Practise, Springer Verlag, Berlin, 1997.

TOYOTA (2010)

Toyota Forklifts: *Das Toyota Produktionssystem und seine Bedeutung für das Geschäft*. Broschüre, Toyota Material Handling Deutschland, Langenhagen, 2010.

TRILUX (2005)

Trilux-Lenze GmbH: *Planungshilfe 13201 - Licht für Europas Straßen; Beleuchtung von Straßen, Wegen und Plätzen nach DIN EN 13201*. Eigenverlag, Arnsberg, 2005.

TROTTER (1995)

Trotter J.: *Das Auge – Ein Handbuch für Augenoptiker*. Optikerverlag, Trimbach (CH), 1995.

U UHL (2002)

Uhl, H.: *Mehrdimensionale Optimierung der Lifecycle Costs von komplexen (Industrie-) Anlagen und Systemen unter Beachtung von Wissensmanagement-Ansätzen*. Universität GH Essen, Dissertation, Essen, 2002.

ULRICH (1994)

Ulrich, K.: *Fundamentals of Product Modularity*. In: Management of Design – Engineering and Management Perspectives, Hrsg.: Dasu, S.; Eastmann, C., Kluwer Academic Publishers, Boston (USA), 1994, S. 219-231.

UN (1992)

United Nations (UN): *AGENDA 21*. United Nations Conference on Environment & Development, Rio de Janeiro (BRA) 1992, United Nations Division for Sustainable Development, <http://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/Agenda21.pdf>; abgerufen am 24.05.2013.

V VDI (2010)

Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *VDI-Richtlinie 3633 – Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialabfluss und Produktionssystemen – Grundlagen*. Beuth Verlag, Berlin, 2010.

VOGT (2012)

Vogt, P.: *Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten*. Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, Einreichversion, Bochum, 2012.

VOGT, ADDEN (2014)

Vogt, P.; Adden, H.: *Der Einfluss der Nutzungsdauer einzelner Bauwerksteile auf die Lebenszykluskostenberechnung von Ingenieurbauwerken*. In: Nachhaltigkeit und Innovation in Baubetrieb und Tunnelbau – Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz. Verlag Dr. Hut, München, 2014, S. 537-549.

VOGT, THEWES (2012)A

Vogt, P.; Thewes, M.: *PPP road tunnel projects and the role of the life-cycle cost approach*. In: Proceedings of International Symposium Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works, Athen (GR). 2012.

VOGT, THEWES (2012)B

Vogt, P.; Thewes, M.: *New Life-cycle Cost Model for Road Tunnels Considering Technical and Financial Uncertainties*. In: Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress, Bangkok (THA), 2012.

VOGT, THEWES (2013)

Vogt, P.; Thewes.: *The Computation of Life-cycle Costs for Road Tunnels*. In: Proceedings of the International Conference on Computational Methods in Tunneling and Subsurface Engineering, Bochum, 2013, S. 821-828.

VOLLMANN, THEWES, KAMARIANAKIS (2012)

Vollmann, G.; Thewes, M.; Kamarianakis, S.: *Evaluation and interpretation of f/n-curves: Development of a new tool for traceable and transparent decision making*. In: Proceedings of the 6th International Conference on Tunnel Safety and Ventilation, Graz (AUT), 2012, S. 49-57.

W WANG, CHANG, EL-SHEIKH (2012)

Wang, N.; Chang, Y.-C.; El-Sheikh, A. A.: *Monte Carlo simulation approach to life cycle cost*. In: Structure and Infrastructure Engineering Vol. 8, No. 8, Taylor and Francis, London (UK), 2012, S. 739-746.

WALTL (2008)

Walzl, A.: *Auslegung, Betrieb und Instandhaltung der Tunnelbetriebstechnik*. In: Tunnel, Sonderheft IUT 2008, Bauverlag, Gütersloh, 2008, S. 62-67.

WATSON (1993)

Watson, G. H.: *Benchmarking – vom Besten lernen*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg a. Lech, 1993.

WECD (1987)

World Commission on Environment and Development (WECD): *Our Common Future*. Report of the World Commission on Environment and Development, United Nation, o. O., 1987.

WEHNER, REINKE (2003)

Wehner, M.; Reinke, P.: *Stand und aktuelle Entwicklungen bei der Lüftung und Entrauchung von Straßen- und Bahntunneln in Mitteleuropa*. In: Forschung und Praxis, Tagungsband zur STUVA-Tagung 2003, Bauverlag, Gütersloh, 2003, S. 129-134.

WEIG (2008)

Weig, S.: *Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten*. Technische Universität München, Dissertation, München, 2008.

WEWEL (2010)

Wewel, M. C.: *Statistik im Bachelor-Studium der BWL und VWL*. 2. Auflage, Person Verlag, München, 2010.

WIEDENMANN (2005)

Wiedenmann, M.: *Risikomanagement bei der Immobilien-Projektentwicklung unter Berücksichtigung der Risikoanalyse und Risikoquantifizierung*. Universität Leipzig, Dissertation, Leipzig, 2005.

WIGGERT (2009)

Wiggert, M.: *Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen*. Technische Universität Graz, Dissertation, Graz (AUT), 2009.

WILDEMANN (2013)

Wildemann, H.: *Prozess-Benchmarking – Leitfaden zur Erreichung von Quantensprüngen in Geschäftsprozessen*. TCW Transfer Centrum, München, 2013.

WITTMANN (1993)

Wittmann, W. (Hrsg.): *Handwörterbuch der Betriebswirtschaft*. Band 3, 5. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993.

WÖHE (2000)

Wöhe, G.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 20. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2000.

WOLL (2004)

Woll, A.: *Allgemeine Volkswirtschaftslehre*. 14. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München, 2004.

WÜBBENHORST (1984)

Wübbenhorst, K. L.: *Konzept der Lebenszykluskosten*. Technische Universität Darmstadt, Dissertation, Verlag für Fachliteratur, Darmstadt, 1984.

Z ZACHER (2010)

Zacher, D.: *Risikoanalyse hochbaulicher PPP-Projekte in Deutschland aus Sicht der Privatwirtschaft*. Technische Universität Berlin, Dissertation, Universitätsverlag, Berlin, 2010.

ZAUNER (2003)

Zauner, H. J.: *Entwicklung eines wahrscheinlichkeitsbasierenden Rechenmodells für den Lebenszyklus einer Hochbau-Immobilie*. Technische Universität Wien, Dissertation, Wien (AUT), 2003.

ZDROWOMYSLAW, KASCH (2002)

Zdrowomyslaw, N.; Kasch, R.: *Betriebsvergleiche und Benchmarking für die Managementpraxis*. Oldenbourg Verlag, München, 2002.

ZEHBOLD (1996)

Zehbold, C.: *Lebenszykluskostenrechnung*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1996.

ZIO (2013)

Zio, E.: *The Monte Carlo Simulation Method for System Reliability and Risk Analysis*. Springer Verlag, London (UK), 2013.

Anhang

Inhaltsverzeichnis – Anhang

Abbildungsverzeichnis – Anhang251

Tabellenverzeichnis – Anhang253

A.1 Weiterführende Grundlagen der Investitionsrechnung und Risikoanalyse255

 A.1.1 Finanzmathematische Transformation255

 A.1.1.1 Aufzinsung 255

 A.1.1.2 Abzinsung 256

 A.1.2 Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Risikoanalyse.....257

 A.1.2.1 Diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen 257

 A.1.2.2 Stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen 259

 A.1.3 Korrelation von Zufallsvariablen.....265

 A.1.4 Risikomaße.....267

 A.1.4.1 Erwartungswert $E(X) = \mu_X$ 267

 A.1.4.2 Modus $Mod(X)$ 268

 A.1.4.3 Median $M(X)$ 268

 A.1.4.4 Varianz $Var(\sigma^2)$ und Standardabweichung σ 268

 A.1.4.5 Schiefe 269

 A.1.4.6 Quantil x_p 270

 A.1.5 Methoden zur Erhebung der Daten für die Risikoanalyse271

 A.1.5.1 Stochastische Datenauswertung 271

 A.1.5.2 Expertenbefragung 273

 A.1.5.3 Delphi-Methode..... 274

 A.1.6 Bestimmung von Zufallszahlen275

 A.1.6.1 Gleichverteilte Zufallszahlen 275

 A.1.6.2 Nicht gleichverteilte Zufallszahlen 276

A.2 Erhebung der Attribute für die Module des Mustertunnels278

 A.2.1 Baugruppe Innenschale278

 A.2.1.1 Modul Gewölbe 279

 A.2.1.2 Modul Sohle 289

 A.2.2 Baugruppe Beleuchtung292

 A.2.2.1 Modul Einfahrtsbeleuchtung 293

 A.2.2.2 Modul Innenbeleuchtung..... 319

 A.2.3 Baugruppe Lüftung335

 A.2.3.1 Modul Lüftungsanlage..... 335

A.3	Kostenkalkulation der Teilleistungen für den Mustertunnel	360
A.3.1	Modul Gewölbe.....	361
A.3.1.1	Gewölbe – Planung.....	361
A.3.1.2	Gewölbe – Umsetzung.....	361
A.3.1.3	Gewölbe – Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)	362
A.3.1.4	Gewölbe – Reinigung (Gewölbe komplett)	363
A.3.1.5	Gewölbe – Inspektion (Laufende Überwachung)	363
A.3.1.6	Gewölbe – Inspektion (Kontrolle).....	364
A.3.1.7	Gewölbe – Inspektion (Prüfung)	364
A.3.1.8	Gewölbe – Wartung	365
A.3.1.9	Gewölbe – 1. Instandsetzung	366
A.3.1.10	Gewölbe – 2. Instandsetzung	366
A.3.2	Modul Sohle.....	367
A.3.2.1	Sohle – Planung.....	367
A.3.2.2	Sohle – Umsetzung.....	367
A.3.3	Modul Einfahrtsbeleuchtung	368
A.3.3.1	Einfahrtsbeleuchtung – Planung.....	368
A.3.3.2	Einfahrtsbeleuchtung – Umsetzung.....	368
A.3.3.3	Einfahrtsbeleuchtung – Versorgung	369
A.3.3.4	Einfahrtsbeleuchtung – Reinigung.....	369
A.3.3.5	Einfahrtsbeleuchtung – Inspektion (Kontrolle).....	370
A.3.3.6	Einfahrtsbeleuchtung – Inspektion (Prüfung).....	370
A.3.3.7	Einfahrtsbeleuchtung – Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)	371
A.3.3.8	Einfahrtsbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel).....	371
A.3.3.9	Einfahrtsbeleuchtung – Instandsetzung (Reparaturarbeiten)	372
A.3.3.10	Einfahrtsbeleuchtung – Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel).....	372
A.3.3.11	Einfahrtsbeleuchtung – Erneuerung (Sensorik).....	373
A.3.3.12	Einfahrtsbeleuchtung – Erneuerung (Leuchten)	373
A.3.4	Modul Innenbeleuchtung.....	374
A.3.4.1	Innenbeleuchtung – Planung	374
A.3.4.2	Innenbeleuchtung – Umsetzung	374
A.3.4.3	Innenbeleuchtung – Versorgung.....	375
A.3.4.4	Innenbeleuchtung – Reinigung	375
A.3.4.5	Innenbeleuchtung – Inspektion (Kontrolle)	376
A.3.4.6	Innenbeleuchtung – Inspektion (Prüfung).....	376
A.3.4.7	Innenbeleuchtung – Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)	377
A.3.4.8	Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel).....	377
A.3.4.9	Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel und Vorschaltgerät)	378
A.3.4.10	Innenbeleuchtung – Instandsetzung (Reparaturarbeiten)	379
A.3.4.11	Innenbeleuchtung – Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel).....	379
A.3.4.12	Innenbeleuchtung – Erneuerung (Sensorik).....	380
A.3.4.13	Innenbeleuchtung – Erneuerung (Leuchten)	380

A.3.5	Modul Lüftungsanlage.....	381
A.3.5.1	Lüftungsanlage – Planung	381
A.3.5.2	Lüftungsanlage – Umsetzung	381
A.3.5.3	Lüftungsanlage – Versorgung.....	381
A.3.5.4	Lüftungsanlage – Reinigung	382
A.3.5.5	Lüftungsanlage – Inspektion (Kontrolle)	382
A.3.5.6	Lüftungsanlage – Inspektion (Prüfung).....	383
A.3.5.7	Lüftungsanlage – Wartung.....	383
A.3.5.8	Lüftungsanlage – Instandsetzung (allgemeine Reparaturarbeiten).....	384
A.3.5.9	Lüftungsanlage – Instandsetzung (Reparatur Lüfter)	384
A.3.5.10	Lüftungsanlage – Instandsetzung (Austausch Lüfter)	385
A.3.5.11	Lüftungsanlage – Instandsetzung (Austausch Sensor)	385
A.3.5.12	Lüftungsanlage – Erneuerung (Sensorik)	386
A.3.5.13	Lüftungsanlage – Erneuerung (Lüfter).....	386
A.4	Kalkulation der Teilleistungen für die Optimierungsansätze	387
A.4.1	Kalkulation der Leistungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs der Beleuchtung durch Tunnelreinigung.....	387
A.4.1.1	Gewölbe Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe).....	387
A.4.1.2	Gewölbe – Reinigung (Gewölbe komplett)	388
A.4.1.3	Einfahrtsbeleuchtung – Versorgung	389
A.4.1.4	Innenbeleuchtung – Versorgung.....	389
A.4.2	Bestimmung der Attribute für das Modul Beschichtung	390
A.4.2.1	Beschreibung	390
A.4.2.2	Definition und Abgrenzung des Moduls	390
A.4.2.3	Elemente	390
A.4.2.4	Prozesse	391
A.4.2.5	Leistungen.....	391
A.4.2.6	Kosten	392
A.4.2.7	Zeitliche Parameter.....	392
A.4.2.8	Schnittstellen.....	392
A.4.3	Kalkulation der Leistungen zur Untersuchung des Optimierungspotentials durch eine Beschichtung des Tunnelgewölbes	393
A.4.3.1	Beschichtung Planung	393
A.4.3.2	Beschichtung – Umsetzung	393
A.4.3.3	Beschichtung – Erneuerung.....	393
A.4.3.4	Gewölbe – Reinigung.....	394
A.4.3.5	Gewölbe – Inspektion	395
A.4.3.6	Gewölbe – Instandsetzung	396
A.4.3.7	Einfahrtsbeleuchtung – Umsetzung.....	397
A.4.3.8	Einfahrtsbeleuchtung – Versorgung	397
A.4.3.9	Einfahrtsbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel).....	398
A.4.3.10	Einfahrtsbeleuchtung – Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel).....	398

A.4.3.11	Einfahrtsbeleuchtung – Erneuerung	399
A.4.3.12	Innenbeleuchtung – Umsetzung	400
A.4.3.13	Innenbeleuchtung – Versorgung.....	400
A.4.3.14	Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel).....	401
A.4.3.15	Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel und Vorschaltgeräte)	401
A.4.3.16	Innenbeleuchtung – Instandsetzung.....	402
A.4.3.17	Innenbeleuchtung – Erneuerung	402

Abbildungsverzeichnis – Anhang

Abbildung A.1.1:	Schema Aufzinsung	255
Abbildung A.1.2:	Schema Abzinsung	256
Abbildung A.1.3:	Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ Binomialverteilung ($n = 10, p = 0,5$)	258
Abbildung A.1.4:	Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ Poissonverteilung ($\mu = 1,5$)	258
Abbildung A.1.5:	Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ Gleichverteilung ($a = 1,5, b = 6,5$)	260
Abbildung A.1.6:	Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ Dreiecksverteilung ($a = 1,5, b = 6,5, c = 4$)	260
Abbildung A.1.7:	Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ Normalverteilung ($\mu = 1; \sigma = 1$)	261
Abbildung A.1.8:	Sigma-Bereiche und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten einer Normalverteilung	262
Abbildung A.1.9:	Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ Exponentialverteilungen ($\lambda = 1,5; \lambda = 0,5$)	263
Abbildung A.1.10:	Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ unterschiedlicher Weibullverteilungen	264
Abbildung A.1.11:	Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ unterschiedlicher Log- Normal-Verteilungen	265
Abbildung A.1.12:	Korrelationskoeffizienten und zugehörige Punktwolken	266
Abbildung A.1.13:	Modus, Median und Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung	268
Abbildung A.1.14:	rechtsschiefe Verteilung	269
Abbildung A.1.15:	linksschiefe Verteilung	270
Abbildung A.1.16:	Quantil einer stetigen Zufallsvariable	270
Abbildung A.1.17:	Transformation einer gleichverteilten Zufallszahl mit der Inversionsmethode	277
Abbildung A.2.18:	Modul-Einteilung Innenschale – Gewölbe und Sohle	278
Abbildung A.2.19:	Regeldetail Anschluss Sohle – Gewölbe	279
Abbildung A.2.20:	Kostenverlauf Wartung – Tunnelgewölbe	285
Abbildung A.2.21:	Schematischer Verlauf der Leuchtdichte am Tage	293
Abbildung A.2.22:	Anordnung Beleuchtung im Tunnelquerschnitt	294
Abbildung A.2.23:	Ausfallrate Leuchten	298
Abbildung A.2.24:	Haltesichtweite in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit bei einer Längsneigung von 0 %	303
Abbildung A.2.25:	Länge der Übergangsstrecke bei $v = 100$ km/h in Abhängig von der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke	304
Abbildung A.2.26:	Möglichkeiten der Leuchtenanordnung	305
Abbildung A.2.27:	Schnittstellen und Einflussgrößen der Einfahrtsbeleuchtung	306
Abbildung A.2.28:	Bildschirmausdruck Simulationssoftware ReluxTunnel	307
Abbildung A.2.29:	Regelquerschnitt – Referenztunnel	309

Abbildung A.2.30: Systemleistung Einfahrtsbeleuchtung (Referenztunnel)	311
Abbildung A.2.31: Prüfkriterien für Schaltstufe 1 – 100 % (Referenztunnel)	312
Abbildung A.2.32: Verlauf der Leuchtdichte für Schaltstufe 1 – 100 % (Referenztunnel)	313
Abbildung A.2.33: Rückgang der Leuchtdichte über die Betriebszeit.....	316
Abbildung A.2.34: Schnittstellen und Einflussgrößen der Innenbeleuchtung	327
Abbildung A.2.35: Systemleistung Innenbeleuchtung (Referenztunnel).....	329
Abbildung A.2.36: Berechnungsergebnisse Leuchtdichte (Referenztunnel).....	329
Abbildung A.2.37: Berechnungsergebnisse Schwellenwerterhöhung TI (Referenztunnel)	329
Abbildung A.2.38: Berechnungsergebnisse Kontrastgütekoeffizient q_c (Referenztunnel)....	329
Abbildung A.2.39: Berechnungsergebnisse Wandleuchtdichte (Referenztunnel)	330
Abbildung A.2.40: Verlauf der Leuchtdichte Innenbeleuchtung – 100 % (Referenztunnel)	330
Abbildung A.2.41: Anordnung Strahlventilatoren im Tunnelquerschnitt	336
Abbildung A.2.42: Ablauf zur Dimensionierung der Tunnellüftung	344
Abbildung A.2.43: Schnittstellen und Einflussgrößen der Tunnellüftung	348
Abbildung A.2.44: Querschnitt Referenztunnel	349

Tabellenverzeichnis – Anhang

Tabelle A.2.1: Relevante Prozesse für das Modul „Gewölbe“281

Tabelle A.2.2: Auswertung des Bauwerksalters bis zur Instandsetzung der Innenschale .287

Tabelle A.2.3: Relevante Prozesse für das Modul „Sohle“290

Tabelle A.2.4: Relevante Prozesse für das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“296

Tabelle A.2.5: Veränderliche Parameter Simulationssoftware „ReluxTunnel“308

Tabelle A.2.6: Ausgangsgrößen für Referenztunnel310

Tabelle A.2.7: Ergebnisse der Parameterstudie für die Schnittstellen der
Einfahrtsbeleuchtung.....314

Tabelle A.2.8: Reduktionsfaktor der Leuchtdichte der Innenstrecke L_{fi} im Tagesverlauf ...320

Tabelle A.2.9: Relevante Prozesse für das Modul „Innenbeleuchtung“321

Tabelle A.2.10: Ergebnisse der Parameterstudie für die Schnittstellen
der Innenbeleuchtung331

Tabelle A.2.11: Relevante Prozesse für das Modul „Lüftungsanlage“338

Tabelle A.2.12: Eingangsgrößen für Luftbedarf und natürliche Luftbewegung.....350

Tabelle A.2.13: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bewertung des Luftbedarfs351

Tabelle A.2.14: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bewertung der natürlichen
Luftbewegung.....352

Tabelle A.2.15: Gegenüberstellung Luftbedarf – natürliche Luftbewegung353

Tabelle A.2.16: Eingangsgrößen zur Berechnung der Schubkräfte aus Brand und Lüftung354

Tabelle A.2.17: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung der erforderlichen
Schubkraft Teil 1 – Untersuchung Parameter – Bauwerk355

Tabelle A.2.18: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung der erforderlichen
Schubkraft Teil 2 – Untersuchung Parameter – Sonstiges.....356

Tabelle A.2.19: Ergebnisse der Parameterstudie zur Dimensionierung der Lüftungsanlage
.....357

Tabelle A.3.20: Gerätekosten und Stundenlöhne zur Kalkulation der Kosten360

Tabelle A.4.21: Relevante Prozesse für das Modul „Beschichtung“391

A.1 Weiterführende Grundlagen der Investitionsrechnung und Risikoanalyse

A.1.1 Finanzmathematische Transformation

Der Wert einer Zahlung wird entscheidend vom Zahlungszeitpunkt geprägt. Weicht der Anfallszeitpunkt betragsmäßig identischer Zahlungen ab, unterscheiden sich die Kapitalwerte der Zahlungen zum definierten Betrachtungszeitpunkt. Für eine Vergleichbarkeit der Zahlungen ist aus diesem Grund eine einheitliche Betrachtungsbasis zu schaffen. Die Zahlungen sind durch Auf- bzw. Abzinsung zeitlich auf den Bezugszeitpunkt zu transformieren.⁶¹⁵

A.1.1.1 Aufzinsung

Durch Aufzinsung wird – unter Einbeziehung der Zinseszinsrechnung – aus dem Wert einer Zahlung zum Zeitpunkt t_0 (= Barwert), deren Wertigkeit zu einem späteren Zeitpunkt t_n (= Endwert) bestimmt.

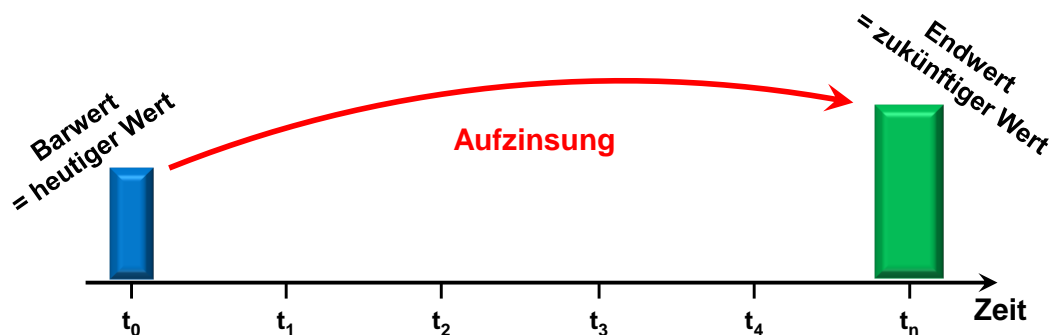


Abbildung A.1.1: Schema Aufzinsung

Der in Abbildung A.1.1 graphisch dargestellte Prozess der Aufzinsung lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken:

$$KW_n = KW_0 \cdot (1 + i)^t = KW_0 \cdot q^t \quad (\text{A.1.1})$$

Dabei gilt:

- KW_n = Kapitalwert zum Zeitpunkt t_n
- KW_0 = Kapitalwert zum Zeitpunkt t_0
- i = Kalkulationszinssatz
- q = $1 + i$
- t = $t_n - t_0$ = Periode
- $(1+i)^t = q^t$ = Aufzinsungsfaktor

⁶¹⁵ vgl. GÖTZE (2008), S. 67; POGGENSEE (2011), S. 116 ff.

A.1.1.2 Abzinsung

Bei der Abzinsung wird der Wert einer Zahlung bestimmt, der zum Zeitpunkt t_0 eingesetzt werden muss (= Barwert), um zum Zeitpunkt t_n den erforderlichen Zahlungswert (= Endwert) zu erhalten (Abbildung A.1.2). Die Abzinsung stellt somit den gegenläufigen Prozess zur Aufzinsung dar.

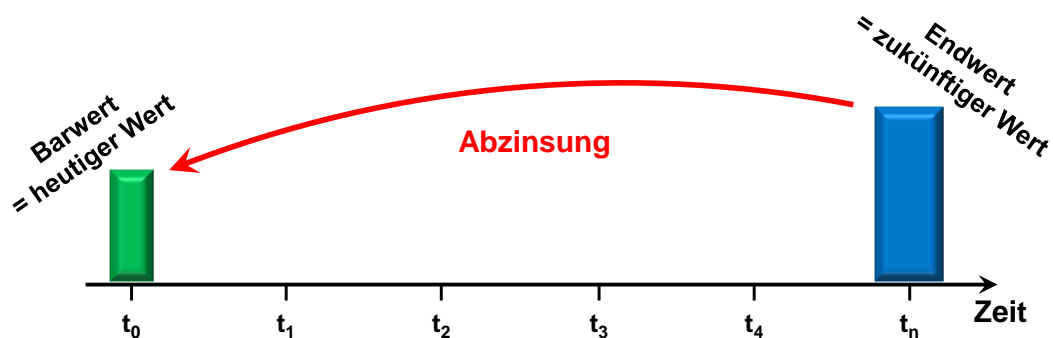


Abbildung A.1.2: Schema Abzinsung

Mathematisch kann die Abzinsung (Diskontierung) wie folgt ausgedrückt werden:

$$KW_0 = KW_n \cdot (1 + i)^{-t} = KW_n \cdot q^{-t} = \frac{KW_n}{q^t} \quad (\text{A.1.2})$$

Dabei gilt:

KW_0 = Kapitalwert zum Zeitpunkt t_0

KW_n = Kapitalwert zum Zeitpunkt t_n

i = Kalkulationszinssatz

q = $1 + i$

t = $t_n - t_0$ = Periode

$(1+i)^{-t} = q^{-t}$ = Abzinsungsfaktor

A.1.2 Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Risikoanalyse

Eine Beschreibung von Risiken in der Lebenszykluskostenrechnung erfolgt mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Nachfolgend werden wesentliche Verteilungsfunktionen zur Beschreibung einzelner Risiken näher erläutert und deren Verwendungsmöglichkeit aufgezeigt. Grundsätzlich ist dabei zwischen diskreten und stetigen Verteilungsfunktionen zu unterscheiden.

A.1.2.1 Diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Bei einer diskreten Verteilung bestimmt sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten möglicher Ausprägungen x_i der Zufallsvariable X über die Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$.⁶¹⁶

Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} P(X = x_i) = p_i & \text{für } x = x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.1.3})$$

Die graphische Darstellung erfolgt durch Stab- oder Balkendiagramme.

Die Verteilungsfunktion (kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilung) gibt die aufsummierte Wahrscheinlichkeit wieder, mit der die Zufallsvariable X Werte von max. x annimmt.

$$F(x) = P(X \leq x) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i) \quad (\text{A.1.4})$$

Dabei gilt: $0 \leq F(x) \leq 1$

Bei diskreten Verteilungen hat der zugehörige Graph einen stufenförmigen Verlauf. Dies bedeutet, dass der Graph an jeder Stelle x mit $F(X = x) > 0$ um den Betrag $P(X = x)$ springt und zwischen den Sprungstellen konstant verläuft.⁶¹⁷

Wesentliche diskrete Verteilungen sind die Binomialverteilung und die Poisson-Verteilung.

Die **Binomialverteilung** beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein konkretes Ereignis bei n -maliger Wiederholung eines Bernoulli-Experiments eintritt. Dabei sind nur zwei Ereignisse möglich (z. B. Münzwurf – Kopf/Zahl oder Roulette – rot/schwarz). Das Ergebnis tritt dabei mit der Wahrscheinlichkeit p ein bzw. mit $1-p$ nicht ein.⁶¹⁸

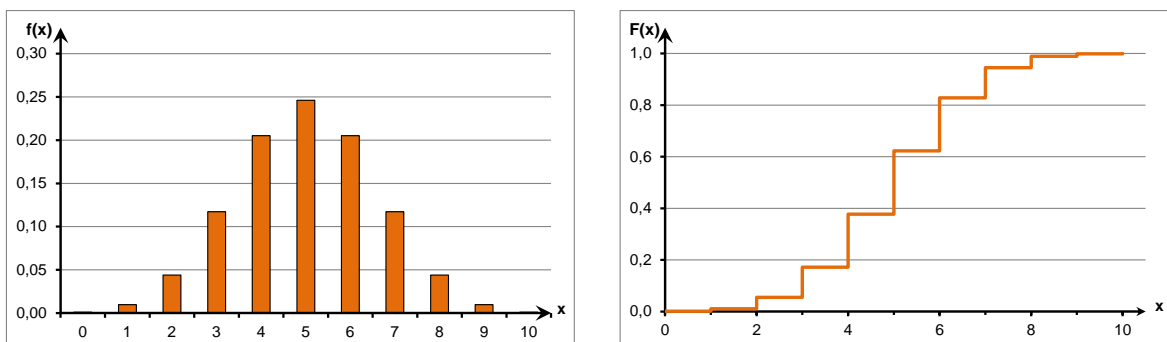
Wahrscheinlichkeitsfunktion einer Binomialverteilung $f(x)$:

$$f(x) = P(X = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (\text{A.1.5})$$

⁶¹⁶ vgl. BOURIER (2011), S. 90 f.; FINKE (2005), S. 48 f.; PAPULA (2011), S. 318 ff.

⁶¹⁷ vgl. HENZE (2010), S. 264; PAPULA (2011), S. 321 f.

⁶¹⁸ vgl. PAPULA (2011), S. 321



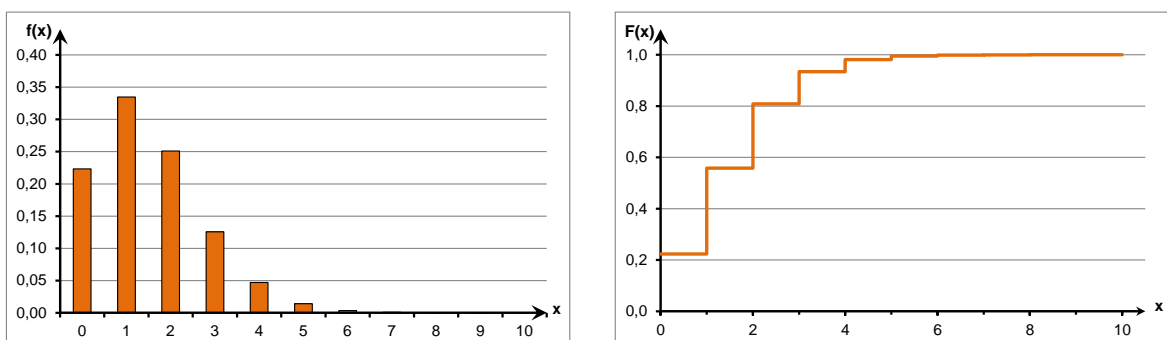
**Abbildung A.1.3: Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$
Binomialverteilung ($n = 10, p = 0,5$)**

Die Binomialverteilung eignet sich beispielsweise zur Simulation der Häufigkeit des Austausches von Bauteilen (k) über die gesamte Lebensdauer des Tunnelbauwerkes (in Jahren) als n -malige Wiederholung.

Die **Poissonverteilung** lässt sich aus der Grenzwertbetrachtung der Binomialverteilung ableiten. Dabei strebt die Anzahl der Wiederholungen n gegen unendlich ($n \rightarrow \infty$) und die Wahrscheinlichkeiten werden sehr gering ($k \rightarrow 0$). Daraus folgt, dass der Erwartungswert μ gegen einen konstanten Wert konvergiert.⁶¹⁹

Wahrscheinlichkeitsfunktion einer Poissonverteilung $f(x)$:

$$f(x) = P(X = k) = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu} \quad k = 0, 1, \dots, n \quad (\text{A.1.6})$$



**Abbildung A.1.4: Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$
Poissonverteilung ($\mu = 1,5$)**

Die Poissonverteilung findet Anwendung bei der Abbildung von sehr seltenen Ereignissen, wie z. B. Instandsetzungsmaßnahmen an der Tunnelröhre, Unfälle oder Katastrophen.

⁶¹⁹ vgl. HENZE (2010), S. 189; MOSLER, SCHMID (2006), S. 79; PAPULA (2011), S. 367

A.1.2.2 Stetige Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Bei stetigen Wahrscheinlichkeitsverteilungen kann die Zufallsvariable X alle (reellen) Werte für x_i annehmen. Im Gegensatz zur diskreten Verteilung ist die Anzahl der möglichen Ergebnisausprägungen nicht mehr zählbar.⁶²⁰ Die zugehörige Verteilungsfunktion $F(x)$ einer stetigen Zufallsvariablen X ist als Integral einer Funktion $f_x: \mathbb{R} \rightarrow [0, \infty]$ darstellbar.⁶²¹

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad \text{für alle } x: \in \mathbb{R} \quad (\text{A.1.7})$$

An die Stelle einer Wahrscheinlichkeitsfunktion tritt bei stetigen Zufallsvariablen die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x)$. Diese wird durch Differenzieren der Verteilungsfunktion $F(x)$ bestimmt.⁶²²

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = F'(x) \quad (\text{A.1.8})$$

Für die Dichtefunktion $f(x)$ einer stetigen Zufallsvariable gelten folgende Voraussetzungen:⁶²³

- Die von der Dichtefunktion und der Abszissenachse aufgespannte Fläche besitzt genau den Wert 1 ($\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$).
- Die Dichtefunktion kann keine negativen Werte annehmen ($f(x) \geq 0$, für $x \in \mathbb{R}$).

Wesentliche stetige Verteilungsfunktionen sind:

- Gleichverteilung (Rechteckverteilung)
- Dreiecksverteilung
- Normalverteilung
- Exponentialverteilung
- Weibullverteilung
- Lognormalverteilung

Bei der **Gleichverteilung** (oder auch Rechteckverteilung) kann die Zufallsvariable jeden beliebigen Wert im vorgegebenen Intervall (a, b) annehmen. Die zwischen diesen Grenzen liegenden Werte besitzen alle die gleiche Eintrittswahrscheinlichkeit. Außerhalb der Schranken ist die Wahrscheinlichkeit gleich null.⁶²⁴

Dichtefunktion einer Gleichverteilung $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.1.9})$$

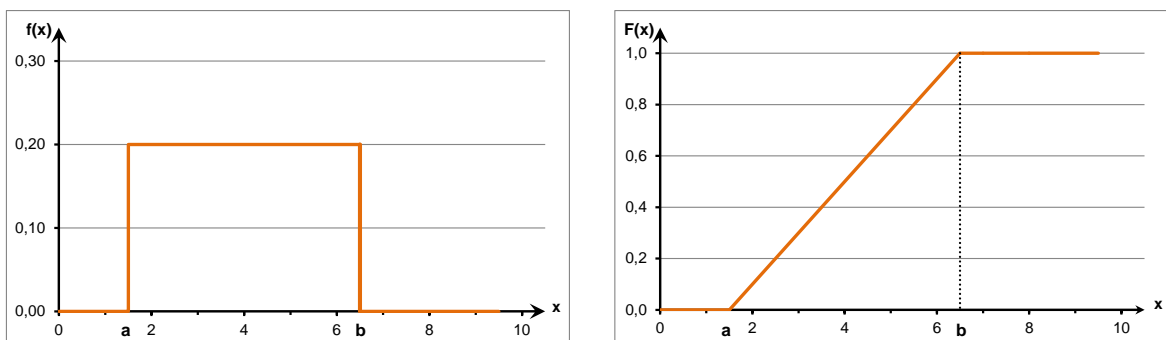
⁶²⁰ vgl. BOURIER (2011), S. 106 f.; PAPULA (2011), S. 317

⁶²¹ vgl. FINKE (2005), S. 58; MOSLER, SCHMID (2006), S. 53; PAPULA (2011), S. 327

⁶²² vgl. BOURIER (2011), S. 107; MOSLER, SCHMID (2006), S. 53

⁶²³ vgl. FINKE (2005), S. 57

⁶²⁴ vgl. FINKE (2005), S. 61; STEIGER (2009), S. 42



**Abbildung A.1.5: Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$
Gleichverteilung ($a = 1,5$, $b = 6,5$)**

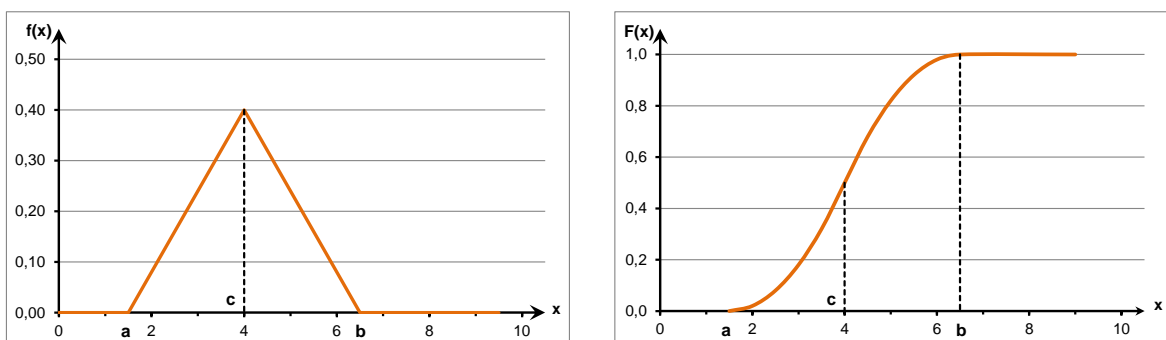
Das Anwendungsgebiet der Gleichverteilung ist dadurch gekennzeichnet, dass die Grenzsituationen (a und b) bekannt sind. Allerdings kann über den dazwischenliegenden Bereich keine Aussage getroffen werden, ob ein Wert mit größerer Wahrscheinlichkeit eintritt.⁶²⁵

Ein Anwendungsbeispiel wären die Investitionskosten für ein Bauteil, von dem lediglich eine Spannbreite der möglichen Kostenausprägung bekannt ist.

Die **Dreiecksverteilung** wird durch drei Parameter beschrieben. Die Grenzwerte werden durch den minimalsten (a) und maximalsten (b) Wert vorgegeben. Der wahrscheinlichste Wert (c) repräsentiert die Spitze des Dreiecks.⁶²⁶

Dichtefunktion einer Dreiecksverteilung $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & \text{für } a \leq x \leq c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & \text{für } c \leq x \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (\text{A.1.10})$$



**Abbildung A.1.6: Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$
Dreiecksverteilung ($a = 1,5$, $b = 6,5$, $c = 4$)**

Die Dreiecksverteilung findet Anwendung, wenn die Grenzwerte sowie ein wahrscheinlicher Wert bekannt sind, allerdings keine exakte Aussage über den Verlauf der Wahrscheinlichkeit getroffen werden kann.

⁶²⁵ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 90

⁶²⁶ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 46

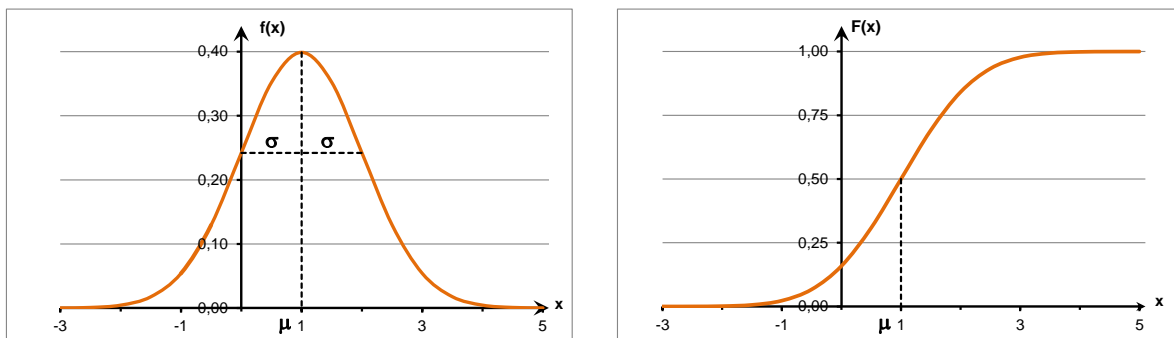
Die **Normalverteilung** ist aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes der Statistik, die am häufigsten verwendete theoretische Verteilungsfunktion.⁶²⁷ Alternativ wird diese auch als Gaußsche-Normalverteilung oder Gauß-Verteilung bezeichnet. Aufgrund der Symmetrie der Dichtefunktion ist auch die Bezeichnung Gaußsche Glockenkurve geläufig.⁶²⁸

Die Normalverteilung wird durch die Parameter μ (Erwartungswert) und σ (Standardabweichung) beschrieben. Der Erwartungswert ist aufgrund der Symmetrie gleichzeitig auch der Mittelwert und gibt das Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichte wieder. Die Standardabweichung vom Erwartungswert ($\mu \pm \sigma$) markiert jeweils den Wendepunkt der Dichtefunktion und bestimmt damit Breite und Höhe der Glockenkurve.⁶²⁹ Die Dichtefunktion einer Normalverteilung nähert sich für $x \rightarrow \pm \infty$ asymptotisch der Abszisse.

Die verwendete Notation lautet $N(\mu; \sigma)$ oder $N(\mu; \sigma^2)$. Für $\mu = 0$ und $\sigma = 1$ ($N(0; 1)$) wird die Verteilung als Standard-Normalverteilung bezeichnet.⁶³⁰

Dichtefunktion einer Normalverteilung $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{für } x \in \mathbb{R} \quad (\text{A.1.11})$$



**Abbildung A.1.7: Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$
Normalverteilung ($\mu = 1; \sigma = 1$)**

Über ein Intervall $[a, b]$ kann durch das Integral der Normalverteilung die Wahrscheinlichkeit F bestimmt werden, mit der der Wert der Zufallsvariable X in diesem Bereich liegt.⁶³¹

$$F(X) = \int_b^a f(X) dX \quad \text{für } a \leq X \leq b \quad (\text{A.1.12})$$

⁶²⁷ Der zentrale Grenzwertsatz der Statistik besagt, dass sich die aus der Summe von Zufallsvariablen resultierende Verteilung, mit steigender Anzahl der Summanden, einer Normalverteilung annähert. Ab einer Anzahl von 30 Summanden kann die Normalverteilung als hinreichend genau für die Approximation stetiger Verteilungen angesehen werden. Bei einer Produktbildung von mehreren unabhängigen Zufallszahlen strebt die Zielgröße eine Log-Normalverteilung an.

vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 283 f.; BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 89 f.; FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 47 f.; MEGILL (1977), S. 36; STELAND (2013), S. 139

⁶²⁸ vgl. BOURIER (2011), S. 163; FINKE (2005), S. 63 f.

⁶²⁹ vgl. BOURIER (2011), S. 163 ff.; PAPULA (2011), S. 373

⁶³⁰ vgl. FINKE (2005), S. 66

⁶³¹ vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 74; MOSLER, SCHMID (2006), S. 110

Für das Intervall $[\mu-1\sigma; \mu+1\sigma]$ beträgt die Wahrscheinlichkeit	~ 68,3%
Für das Intervall $[\mu-2\sigma; \mu+2\sigma]$ beträgt die Wahrscheinlichkeit	~ 95,5%
Für das Intervall $[\mu-3\sigma; \mu+3\sigma]$ beträgt die Wahrscheinlichkeit	~ 99,7%
Für das Intervall $[\mu-4\sigma; \mu+4\sigma]$ beträgt die Wahrscheinlichkeit	~ 99,9%

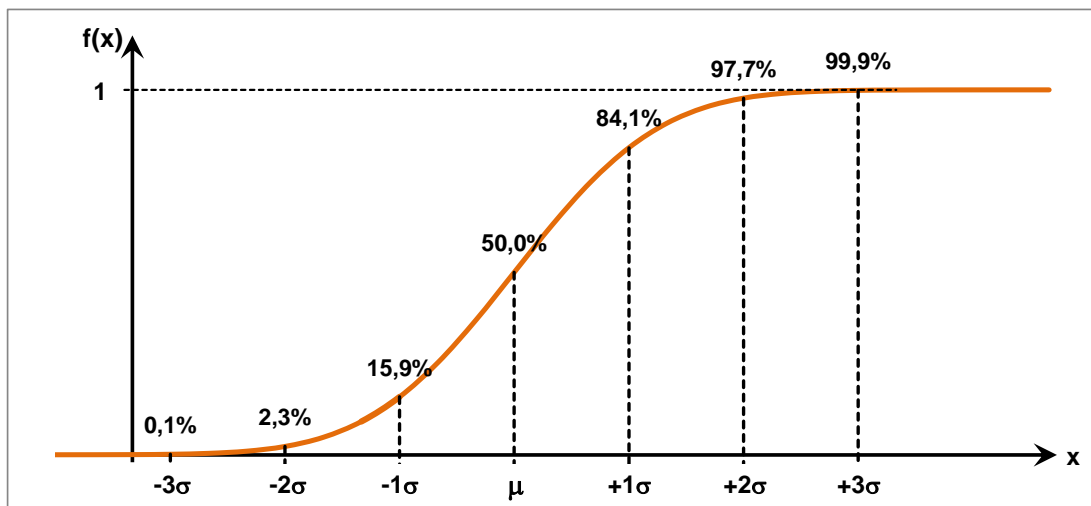


Abbildung A.1.8: Sigma-Bereiche und Unterschreitungswahrscheinlichkeiten einer Normalverteilung

Für die Bildung einer Verteilungsfunktion kann diese Kenntnis dazu genutzt werden, dass beispielsweise durch Abschätzung der maximalen und minimalen Werte für die Realisation das Intervall gebildet wird. Hieraus bestimmen sich dann Mittelwert sowie Standardabweichung, womit sich die Verteilungsfunktion ableiten lässt.

Bei einem Intervall $[\mu-3\sigma; \mu+3\sigma]$ würde der Bereich 99,7% aller Werte umfassen. Lediglich 0,15 % würden jeweils außerhalb dieser Grenzen liegen. Aufgrund der geringen Eintrittswahrscheinlichkeit wären diese Werte für eine Simulation von untergeordneter Bedeutung. Auf eine Abbildung des „unendlichen“ Ausprägungsraumes kann somit verzichtet werden.

Bei einem ausreichend großen Datensatz kann die Normalverteilung, aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes der Statistik, für unterschiedliche Bereiche eingesetzt werden. Insbesondere für Eingangsgrößen, die sich aus einer Vielzahl, mitunter risikobehafteter Werte, zusammensetzen.

Bei der **Exponentialverteilung**, einer Sonderform der Gama-Verteilung⁶³², wird die Form wesentlich durch den Parameter λ bestimmt. Dieser Formparameter ist ein Maß für die Anzahl der erwarteten Ereignisse pro Einheitsintervall.⁶³³ Je größer λ , desto größer ist die Wahrscheinlichkeitsmasse in der Nähe von Null. Gleichzeitig fällt die Dichte mit steigendem x rasch ab.⁶³⁴ Die beiden Parameter Mittelwert und Standardabweichung sind bei einer Exponentialverteilung immer identisch ($\mu = \sigma = 1/\lambda$).⁶³⁵ Die Verteilung lässt sich auf die diskrete Poissonverteilung zurückführen.⁶³⁶

⁶³² vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 31

⁶³³ vgl. BOURIER (2011), S. 162

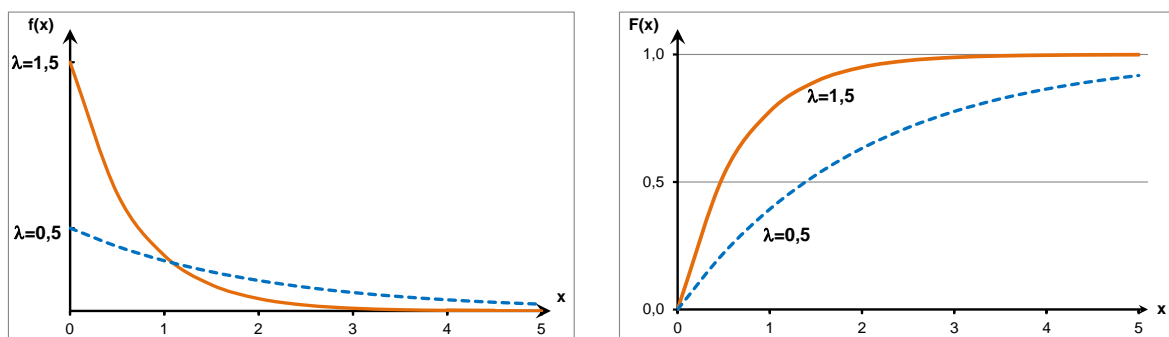
⁶³⁴ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 94

⁶³⁵ vgl. PAPULA (2011), S. 391

⁶³⁶ vgl. BOURIER (2011), S. 160

Dichtefunktion einer Exponentialverteilung $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda \cdot e^{-\lambda x} & \text{für } x \geq 0 \\ 0 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (\text{A.1.13})$$



**Abbildung A.1.9: Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$
Exponentialverteilungen ($\lambda = 1,5$; $\lambda = 0,5$)**

Die Exponentialfunktion findet Anwendung zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit und damit zur Modellierung der Betriebsdauern von elektronischen Bauteilen. Es wird der Zeitraum bestimmt, in dem ein bestimmtes Ereignis nicht eintritt.⁶³⁷

Mit der Verteilungsfunktion

$$F(x) = P(X \leq x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad \text{für } x > 0 \quad (\text{A.1.14})$$

kann die Wahrscheinlichkeit bestimmt werden, dass die Lebensdauer X des zu untersuchenden Bauteils den Zeitpunkt x nicht überschreitet. Es wird ein konstantes, zeitunabhängiges Ausfallverhalten abgebildet. Dies bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit der Betriebsdauer X (die bereits den Wert x überschritten hat) den Wert $x+s$ überschreitet, gleich der Wahrscheinlichkeit ist, dass diese den Wert x übertrifft. Die Exponentialfunktion ist deshalb den „gedächtnislosen“ Verteilungen zu zuordnen.⁶³⁸ Das heißt, dass hieraus, unabhängig von der bisherigen fehlerfreien Betriebsdauer, kein Einfluss auf das zukünftige Ausfallverhalten erwächst.⁶³⁹ Dadurch wird der Anwendungsbereich überwiegend auf elektronische Bauteile ohne großen Verschleiß eingegrenzt.⁶⁴⁰

Im Bereich des Tunnelbauwerkes wären dies beispielsweise Leuchten, elektronische Sensoren (Leuchtdichtemessgerät, Luftgeschwindigkeitsmessgerät) oder Fluchtwegkennzeichen.

Bei der **Weibullverteilung** handelt es sich um eine zweiparametrische Verteilungsfunktion. Sie besitzt einen Formparameter k und einen Skalierungsparameter λ .

Dichtefunktion einer Weibullverteilung $f(x)$:

$$f(x) = \lambda k(x)^{k-1} \cdot e^{-\lambda(x)^k} \quad \text{für } x, k, \lambda > 0 \quad (\text{A.1.15})$$

⁶³⁷ vgl. BOSCH (2011), S. 140; MOSLER, SCHMID (2006), S. 97; PAPULA (2011), S. 391 f.

⁶³⁸ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 97

⁶³⁹ vgl. BIROLINI (1997), S. 261

⁶⁴⁰ vgl. FLEISCHER, WAWERLA (2007), S. 6

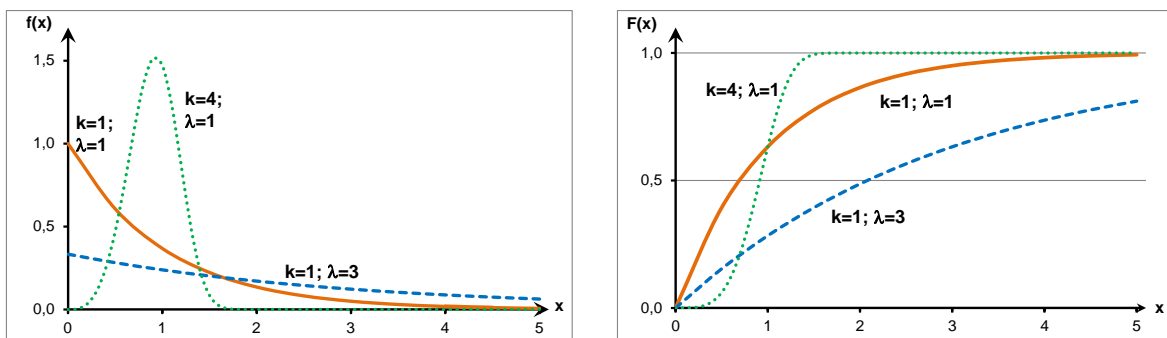


Abbildung A.1.10: Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ unterschiedlicher Weibullverteilungen

Die Weibullverteilung findet überwiegend Anwendung bei der Modellierung von Ausfallverhalten für maschinentechnische Bauteile und Anlagen.⁶⁴¹ Dabei ist x als Zeitvariable, der Skalierungsparameter λ als Lebensdauer anzusehen. Wie VOGT nachgewiesen hat, ist diese auch auf die maschinentechnischen Bauelemente von Straßentunnel übertragbar, beispielsweise Tunnellüfter, Schrankenanlagen oder Lüftungsklappen.⁶⁴² Der Vorteil der Weibullverteilung liegt darin, dass für verwertbare Aussagen bereits ein geringer Datenumfang ausreicht.⁶⁴³

Die Weibullverteilung kann mit einem Lageparameter (X_0) zu einer dreiparametrischen Verteilungsfunktion erweitert werden. Bezogen auf die Lebensdauer kann dieser als „ausfallfreie Zeit“ (= Früh- und Zufallsausfälle) interpretiert werden, so dass X_0 den Zeitpunkt festlegt, ab dem – gemäß der Badewannenkurve⁶⁴⁴ – mit einem Verschleiß- bzw. Ermüdungsausfall zu rechnen ist.⁶⁴⁵

$$f(x) = \lambda k(x - X_0)^{k-1} \cdot e^{-\lambda(x-X_0)^k} \quad \text{für } x, k, \lambda > 0; 0 < X_0 < x \quad (\text{A.1.16})$$

Ausgangsbasis für die **Logarithmische Normalverteilung** (Lognormalverteilung) ist die Normalverteilung. Dabei werden die Merkmalsausprägungen x logarithmiert. Es wird zwischen einer zweiparametrischen $LN(\mu; \sigma)$ und einer dreiparametrischen $LN(\mu; \sigma; X_0)$ Verteilung differenziert. Ist der Lageparameter $X_0 = 0$, sind beide Verteilungen identisch.⁶⁴⁶

Dichtefunktion einer Lognormalverteilung $f(x)$:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma \cdot (x - X_0)} \cdot e^{-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}} & \text{für } x > 0 \\ 0 & \text{für } x \leq 0 \end{cases} \quad (\text{A.1.17})$$

⁶⁴¹ vgl. BERTSCHE, LECHNER (2004), S. 41; FLEISCHER, WAWERLA (2007), S. 6

⁶⁴² vgl. VOGT (2012), S. 113

⁶⁴³ vgl. FLEISCHER, WAWERLA (2007), S. 6

⁶⁴⁴ Die Badewannenkurve beschreibt die Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils über die gesamte Lebensdauer. Dabei werden drei Bereiche unterschieden. Frühausfälle mit einem erhöhten Ausfallrisiko, Zufallsausfälle mit einem gleichbleibend niedrigen Risiko sowie Verschleiß- und Ermüdungsausfälle mit einer über die Zeit zunehmenden Ausfallwahrscheinlichkeit. [vgl. FLEISCHER, WAWERLA (2007), S. 7]

⁶⁴⁵ vgl. BERTSCHE, LECHNER (2004), S. 43

⁶⁴⁶ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 39; STEIGER (2009), S. 225 f.

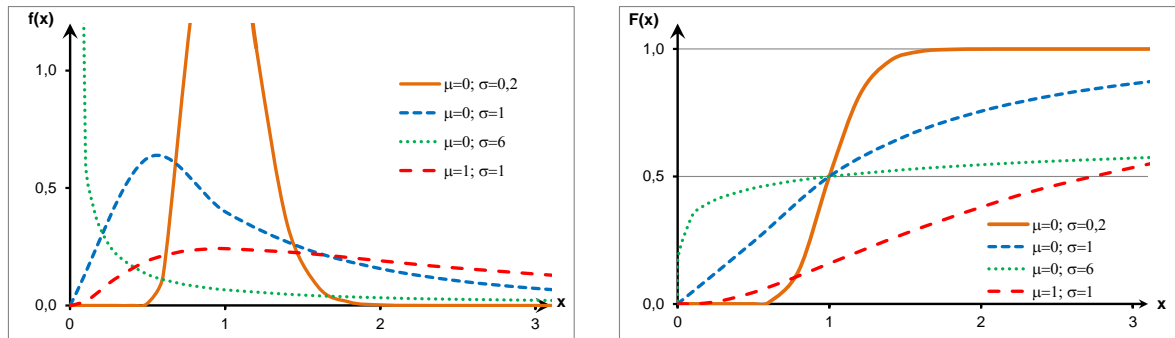


Abbildung A.1.11: Dichtefunktion $f(x)$ und Verteilungsfunktion $F(x)$ unterschiedlicher Log-Normal-Verteilungen

Wesentliche Merkmale der Lognormalverteilung sind die Rechtsschiefe und die damit verbundene Asymmetrie sowie ein Grenzwert der nicht über- bzw. unterschritten wird. Verwendung findet die Lognormalverteilung zur Darstellung von Extremwertverteilungen oder Ausfallverhalten von Bauteilen in der Betriebsfestigkeit.⁶⁴⁷

A.1.3 Korrelation von Zufallsvariablen

Zur Berücksichtigung von Abhängigkeiten der Eingangsparameter in einer Risikoanalyse müssen im Vorfeld sogenannte statistische Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen bestimmt werden.⁶⁴⁸ An dieser Stelle wird auf das Verfahren nach Bravais-Pearson näher eingegangen. Weitere Möglichkeiten zur Feststellung der Korrelationen wären beispielsweise die Rangkorrelation nach Spearman, der Kontingenzkoeffizient oder das Konzept von Copulae. Entsprechende Erläuterungen und Anwendungsmöglichkeiten sind der einschlägigen Literatur zu entnehmen.⁶⁴⁹

Lineare Korrelation nach Bravais-Pearson

Ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Eingangsgrößen lässt sich durch die **Kovarianz** darstellen. Die Kovarianz ist dabei ein Maß für die Verbundstreuung der jeweiligen Zufallsvariablen (X und Y) und stellt das arithmetische Mittel der Kreuzprodukte dar.⁶⁵⁰

Die **Kovarianz** ist wie folgt definiert:

$$\text{Cov}(X, Y) = \sigma_{XY} = E\left((X - \mu_X) \cdot (Y - \mu_Y)\right) \quad (\text{A.1.18})$$

Für diskrete Zufallsvariablen X und Y gilt:

$$\text{Cov}(X, Y) = \sigma_{XY} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \mu_X) \cdot (y_j - \mu_Y) \cdot f_{X,Y}(x_i, y_j) \quad (\text{A.1.19})$$

⁶⁴⁷ vgl. BERTSCHE, LECHNER (2004), S. 58

⁶⁴⁸ vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 92

⁶⁴⁹ siehe z. B. AUER, ROTTMANN (2010); MOSLER, SCHMID (2006); PAPULA (2011)

⁶⁵⁰ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 172 f.

Die Kovarianz für stetige Zufallsvariablen X und Y ergibt sich mit:

$$\text{Cov}(X, Y) = \sigma_{XY} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X) \cdot (y - \mu_Y) \cdot f_{X,Y}(x, y) \quad (\text{A.1.20})$$

Bei einer Kovarianz mit positivem Vorzeichen lässt sich die Abhängigkeit als positiver linearer Zusammenhang interpretieren. Dies bedeutet, große X -Werte gehen tendenziell mit großen Y -Werten einher. Umgekehrt deutet eine negative Kovarianz darauf hin, dass große X -Werten kleine Y -Werte bedingen. Eine Kovarianz von null zeigt an, dass kein linearer Zusammenhang zwischen den Zufallsvariablen X und Y besteht.⁶⁵¹

Das Ergebnis der Kovarianz ist nicht normiert und kann dadurch jede beliebige Zahl annehmen.⁶⁵² Der Grad einer Abhängigkeit lässt sich hieraus nur schwer ableiten. Durch eine Normierung, bei der die Streuung aus der Kovarianz ausgeschaltet wird, kann eine Vergleichbarkeit erzielt werden.⁶⁵³ Der dabei ermittelte **Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson**⁶⁵⁴ ergibt sich aus der Division des Produktes der Standardabweichung zweier Zufallsvariablen. Das Ergebnis ist ein dimensionsloses, normiertes Maß für den Grad der linearen Abhängigkeit.⁶⁵⁵

Korrelationskoeffizient nach Bravais und Pearson:

$$\text{Corr}(X, Y) = \rho_{XY} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sqrt{\text{Var}(X)} \cdot \sqrt{\text{Var}(Y)}} \quad (\text{A.1.21})$$

Für den Korrelationskoeffizient können ausschließlich Werte zwischen -1 und $+1$ auftreten ($-1 \leq \rho_{X,Y} \leq +1$). Für $\rho_{X,Y} = -1$ liegt eine perfekt negative Abhängigkeit bzw. umgekehrt für $\rho_{X,Y} = +1$ eine perfekt positive Abhängigkeit vor. Dies bedeutet, dass ein exakt linearer Zusammenhang zwischen den Zufallsvariablen vorliegt und somit eine Zufallsvariable vollständig durch die andere dargestellt werden kann. Für $\rho_{X,Y} = 0$ liegt keine lineare Abhängigkeit vor. Beide Zufallsvariablen sind somit unkorreliert. Dies bedeutet jedoch nicht zwangsläufig, dass eine stochastische Unabhängigkeit vorliegt. Stattdessen können nicht-lineare Abhängigkeiten (z. B. parabolisch) vorliegen (Abbildung A.1.12).⁶⁵⁶

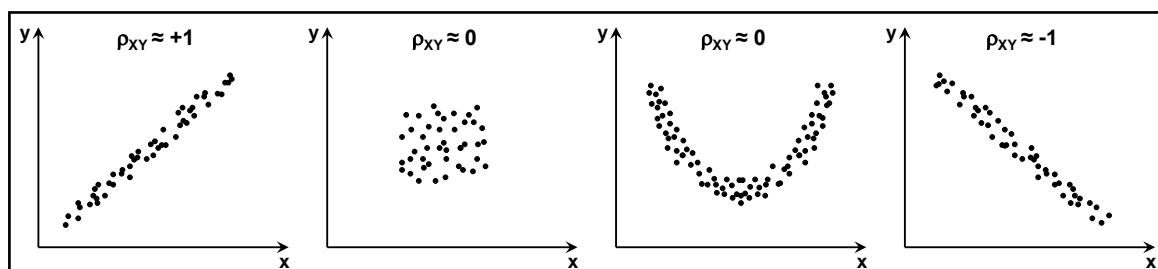


Abbildung A.1.12: Korrelationskoeffizienten und zugehörige Punktwolken⁶⁵⁷

⁶⁵¹ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 173; MOSLER, SCHMID (2006), S. 136

⁶⁵² vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 136

⁶⁵³ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 178

⁶⁵⁴ Auguste Bravais (1811-1863), Karl Pearson (1857-1936)

⁶⁵⁵ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 137; PAPULA (2011), S. 622

⁶⁵⁶ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 137; PAPULA (2011), S. 626

⁶⁵⁷ in Anlehnung an STEIGER (2009), S. 46

Bei der Bestimmung der Korrelation ist darauf zu achten, dass keine Scheinkorrelation vorliegt. Das bedeutet, dass nach den vorgenannten Ansätzen eine Korrelation zu ermitteln ist, jedoch kein kausaler Zusammenhang zwischen den beiden Zufallsvariablen vorhanden ist. Grund hierfür kann eine weitere, dritte Zufallszahl sein, die eine Korrelation der beiden anderen Variablen hervorruft.⁶⁵⁸ Entsprechende Vorüberlegungen hinsichtlich möglicher kausaler Zusammenhänge sind deshalb dringend angeraten.

A.1.4 Risikomaße

Wahrscheinlichkeitsverteilungen können eindeutig durch die Risikomaße charakterisiert werden. Dadurch lassen sich die Informationen der Verteilung komprimiert darstellen und für Vergleiche mit anderen Verteilungen gezielt gegenüberstellen.

Die wesentlichen Parameter umfassen:

- Erwartungswert $E(X) = \mu_x$
- Modus $\text{Mod}(X)$
- Median $M(X)$
- Varianz $\text{Var} = \sigma^2$ und Standardabweichung σ
- Schiefe $\gamma_1(x)$
- Quantil (x_p)

Die Parameter Erwartungswert, Modus und Median werden auch als „Lagemaße“ bzw. „Lageparameter“ bezeichnet. Varianz und Standardabweichung werden unter dem Begriff „Streuungsmaße“ zusammengefasst.⁶⁵⁹

A.1.4.1 Erwartungswert $E(X) = \mu_x$

Der Erwartungswert entspricht dem Durchschnittswert, den eine Zufallsvariable bei unendlich vielen Durchführungen eines Zufallsexperimentes annimmt. Er ist dadurch dem Schwerpunkt der Wahrscheinlichkeitsverteilung gleichzusetzen (Abbildung A.1.13).⁶⁶⁰

Der Erwartungswert einer **diskreten** Zufallsvariable X entspricht der Summe aller mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeit $f(x_i)$ gewichteten Ergebnisse x_i .⁶⁶¹

$$E(X) = \mu_x = \sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x_i) \quad (\text{A.1.22})$$

Bei einer **stetigen** Zufallsvariable X bestimmt sich der Erwartungswert $E(x)$ oder μ_x durch das entsprechende Integral über die vorgegebenen Grenzen.⁶⁶²

$$E(X) = \mu_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx \quad (\text{A.1.23})$$

⁶⁵⁸ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 186

⁶⁵⁹ vgl. PAPULA (2011), S. 486 f.

⁶⁶⁰ vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 206 f.

⁶⁶¹ vgl. BOURIER (2011), S. 99; PAPULA (2011), S. 336

⁶⁶² vgl. PAPULA (2011), S. 337

A.1.4.2 Modus $\text{Mod}(X)$

Der Modus (oder auch Modalwert) einer Verteilung ist der Wert, bei dem die Wahrscheinlichkeitsfunktion $f(x_i)$ einer diskreten bzw. die Dichtefunktion $f(x)$ einer stetigen Zufallsvariable den maximalen Wert annimmt (Abbildung A.1.13). Der Modus ist der Wert einer Verteilung mit der größten Häufigkeit.⁶⁶³ Abhängig von der Verteilungsfunktion kann eine Verteilung mehrere Modalwerte besitzen. Entsprechende Verteilungen werden als bi- bzw. multimodale Funktionen bezeichnet.⁶⁶⁴

A.1.4.3 Median $M(X)$

Der Median (oder auch Zentralwert) teilt die Werte der Zufallsvariable in zwei identische Hälften. 50 % der Werte sind kleiner oder gleich, 50 % sind größer oder gleich dem Median (Abbildung A.1.13).⁶⁶⁵ Dieser wird auch als das 50 %-Quantil einer Verteilung bezeichnet. Der Median ist dadurch unabhängig von Extremwerten.⁶⁶⁶

Sofern eine symmetrische Verteilung für die Zufallsvariable vorliegt, sind die Parameter Erwartungswert, Modus und Median identisch (Abbildung A.1.13).⁶⁶⁷

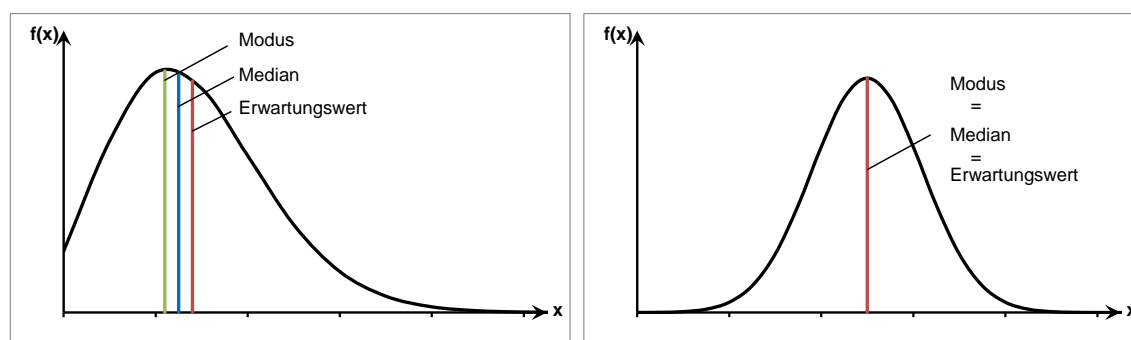


Abbildung A.1.13: Modus, Median und Erwartungswert einer Wahrscheinlichkeitsverteilung

A.1.4.4 Varianz $\text{Var}(\sigma^2)$ und Standardabweichung σ

Die Streuung der möglichen Ergebnisse um den Erwartungswert $E(X)$ bzw. μ_X wird durch die Varianz charakterisiert. Die Varianz ist dabei das Quadrat der mittleren Standardabweichung. Diese beiden Parameter geben Auskunft über den Grad der Unsicherheit bzgl. des Eintretens der untersuchten Variable. Je größer die Varianz, desto unsicherer das Ergebnis. Gegenüber der Varianz hat die Standardabweichung den Vorteil, dass diese in Dimension und Einheit mit der Zufallsvariablen X übereinstimmt und damit ein einfacherer Bezug hergestellt werden kann.⁶⁶⁸

Allgemein gilt für die **Varianz**:

$$\text{Var}(X) = \sigma_X^2 = E\left((X - \mu_X)(X - \mu_X)\right) = E\left((X - \mu_X)^2\right) = E(X^2) - \mu_X^2 \quad (\text{A.1.24})$$

⁶⁶³ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 113

⁶⁶⁴ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 113; HILL (2012), S. 115

⁶⁶⁵ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 60

⁶⁶⁶ vgl. COTTIN, DÖHLER (2013), S. 113; PAPULA (2011), S. 486

⁶⁶⁷ vgl. STEIGER (2009), S. 219

⁶⁶⁸ vgl. BOURIER (2011), S. 101; PAPULA (2011), S. 340

Die Varianz für eine **diskrete** Zufallsvariable X lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\text{Var}(X) = \sigma_X^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_X)^2 \cdot f(x_i) \quad (\text{A.1.25})$$

Beim Vorliegen einer **stetigen** Verteilungsfunktion gilt analog:

$$\text{Var}(X) = \sigma_X^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X)^2 \cdot f(x) dx \quad (\text{A.1.26})$$

Für die **Standardabweichung** gilt allgemein:

$$\sigma_X = \sqrt{\sigma_X^2} = \sqrt{\text{Var}(X)} \quad (\text{A.1.27})$$

A.1.4.5 Schiefe

Zwei Verteilungen können trotz gleicher Mittelwerte und Varianzen abweichende Verteilungs- bzw. Dichtefunktionen aufweisen. Für eine genauere Bestimmung der Verteilung ist deshalb das Risikomaß der Schiefe zu ermitteln.⁶⁶⁹

Die Schiefe als Formparameter charakterisiert die Symmetrie einer Verteilung. Sie stellt die Abweichung zwischen einer Verteilung von seiner symmetrischen Lage und Streuung dar.⁶⁷⁰ Die Schiefe gibt an, wie sehr eine Verteilung nach rechts bzw. nach links geneigt ist.

Das Maß der Schiefe lässt sich wie folgt bestimmen:

$$\gamma_1(X) = \frac{E(X - E(X))^3}{\sigma_X^3} = \frac{E((X - \mu_X)^3)}{\sigma_X^3} \quad (\text{A.1.28})$$

Für $\gamma_1(x) = 0$ liegt eine symmetrische Verteilung vor.

Für $\gamma_1(x) > 0$ ist die Verteilung **rechtsschief**.

Der Verlauf einer rechtsschiefen Verteilung steigt von links nach rechts steil an und läuft mit zunehmender Zufallsvariable nach rechts flach aus (Abbildung A.1.14).

Bei einer rechtsschiefen Verteilung gilt: Erwartungswert > Median > Modus

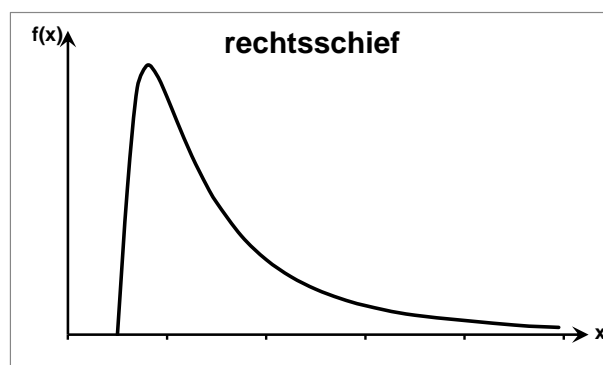


Abbildung A.1.14: rechtsschiefe Verteilung

⁶⁶⁹ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 115

⁶⁷⁰ vgl. MOSLER, SCHMID (2006), S. 72

Für $\gamma_1(x) < 0$ ist die Verteilung **linksschief**.

Eine linksschiefe Verteilung steigt von rechts nach links steil an und läuft mit abnehmen-der Zufallsvariable nach links flach aus (Abbildung A.1.15).

Bei einer linksschiefe Verteilung gilt: Erwartungswert < Median < Modus

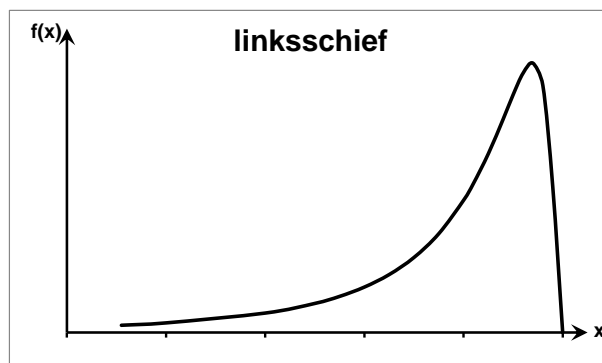


Abbildung A.1.15: linksschiefe Verteilung

A.1.4.6 Quantil x_p

Das p -Quantil unterteilt die Verteilung in zwei Abschnitte. Der linke Wert entspricht der Größe p , der rechte Wert der Größe $(1-p)$ (Abbildung A.1.16). Dabei kann p alle reellen Wert zwischen 0 und 1 annehmen.⁶⁷¹ Quantile stellen eine Generalisierung des Median dar. Für $p = 0,5$ (= 50 %) oder auch 0,5-Quantil entspricht das zugehörige Quantil dem Median. Die Quantile x_{25} und x_{75} heißen unteres bzw. oberes Quartil.⁶⁷²

$$P(X \leq x_p) = F(x_p) = p \quad \text{für } x \geq 0 \quad (\text{A.1.29})$$

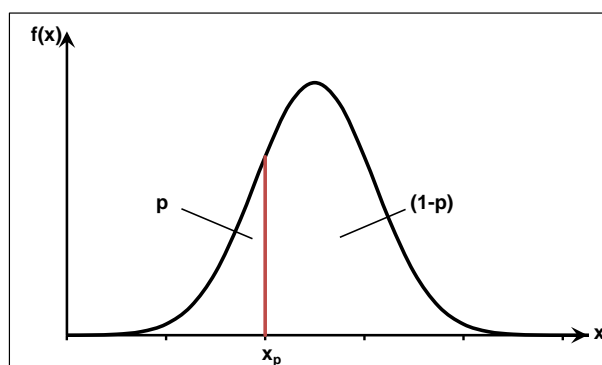


Abbildung A.1.16: Quantil einer stetigen Zufallsvariable

Mit dem Quantil-Wert lässt sich eine Wahrscheinlichkeit p vorgeben unterhalb bzw. oberhalb der die Zufallsvariable X eintritt. Im Risikomanagement wird Synonym zur Darstellung des Risikomaßes der Begriff Value-at-Risk (VaR) verwendet.⁶⁷³

⁶⁷¹ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 86; HENZE (2010), S. 278

⁶⁷² vgl. HENZE (2010), S. 278

⁶⁷³ vgl. FINKE (2005), S. 71 f.

A.1.5 Methoden zur Erhebung der Daten für die Risikoanalyse

A.1.5.1 Stochastische Datenauswertung

Beim Vorliegen empirischer Daten ist zur Auswertung und zur Ermittlung von Kennzahlen, Abhängigkeiten, Häufigkeitsverteilungen usw. auf die mathematischen Methoden der Statistik zurückzugreifen.⁶⁷⁴ Abhängig von der Datenbasis wird dabei folgende Unterscheidung vorgenommen:

- **Längsschnittdaten**, oder auch zeitabhängige Daten, werden aus zeitlich wiederkehrenden Beobachtungen (Zeitreihen) der gleichen statischen Einheit erhoben (z. B. die Erfassung des jährlichen Energieverbrauchs der Beleuchtung eines Tunnels über mehrere Jahre hinweg).⁶⁷⁵
- **Querschnittsdaten** liegen dann vor, wenn von mehreren statischen Einheiten, zum gleichen Zeitpunkt Daten erhoben wurden (z. B. die Kosten für die Tunnelinspektion von unterschiedlichen Tunnelbauwerken eines Jahres).⁶⁷⁶

Stehen zur Auswertung vollumfängliche Datensätze (eine sog. Grundgesamtheit) zur Verfügung, sind die Parameter mit Hilfe der **deskriptiven** (beschreibenden) **Statistik** zu bestimmen. Durch die mathematische Beschreibung mittels standardisierter Kennzahlen (Mittelwert, Erwartungswert usw.) lassen sich die empirischen Daten zahlenmäßig darstellen. Eine tabellarische bzw. graphische Aufbereitung hilft, die meist unsortierten Daten zu strukturieren, übersichtlich darzustellen und fehlerbehaftete Daten gezielt herauszufiltern.⁶⁷⁷ Bei Vorliegen einer Grundgesamtheit kann der Ablauf einer Datenauswertung wie folgt beschrieben werden:⁶⁷⁸

- **Datenaufbereitung**

Die Daten bzw. Merkmalsausprägungen können verschiedener Art sein. Die für eine Lebenszykluskostenrechnung wesentliche Form sind kardinale Daten (diskret oder stetig). Für eine bessere Übersicht sorgt eine Strukturierung in tabellarischer Form. Durch die graphische Aufbereitung, beispielsweise in Häufigkeitsverteilungen, lassen sich zudem vorhandene Beziehungen von Merkmalen untereinander leichter identifizieren.

- **Quantifizierung wesentlicher Kennzahlen**

Bei der Quantifizierung werden aus den vorliegenden Daten die Merkmalswerte in Form von Kennzahlen abgeleitet. Mittels statistischer Rechenverfahren werden die unterschiedlichen Momente – Lagemaße (z. B. Modus, Median, Mittelwert), Streuungsmaße (Varianz und Standardabweichung) und Schiefe – bestimmt.

- **Feststellung vorliegender Abhängigkeiten**

Mit Hilfe von Korrelations- bzw. Regressionsanalysen sind Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Merkmalen festzustellen und deren Grad zu bestimmen. Korrelationsanalysen helfen dabei, sog. ungerichtete Abhängigkeiten (ohne funktionalen Zusammenhang) zu quantifizieren. Kann davon ausgegangen werden, dass ein linearer Zusammenhang vorliegt, ist eine Regressionsanalyse vorzunehmen.

⁶⁷⁴ vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 3

⁶⁷⁵ vgl. WEWEL (2010), S. 99

⁶⁷⁶ vgl. WEWEL (2010), S. 99

⁶⁷⁷ vgl. STELAND (2013), S. 1

⁶⁷⁸ vgl. ECKEY, KOSFELD, TÜRCK (2008), S. 30 ff., S. 55 ff. bzw. S. 167 ff. oder STELAND (2013), S. 8 ff., S. 21 ff. bzw. S. 46 ff.

Bei einer fehlenden Grundgesamtheit der Daten ist auf die **induktive** (schließende) **Statistik** zurückzugreifen. Ausgehend von der vorliegenden Teilmenge der Grundgesamtheit (Stichprobe) erfolgt dabei ein Rückschluss auf die Grundgesamtheit mit Hilfe von Ansätzen aus der Wahrscheinlichkeitstheorie. Trotz unvollständiger Datensätze sind so Aussagen über die erforderlichen Parameter sowie deren zukünftige Entwicklung (Prognose) möglich. Dazu notwendig sind Schätzverfahren zur Bestimmung der erforderlichen Kennzahlen sowie Verfahren zu Prüfung der mittels Schätzung bestimmten Parameter.⁶⁷⁹

Durch die nicht vollständige Datenmenge ist der Rückschluss auf die Grundgesamtheit mit dem Risiko einer fehlerhaften Interpretation verbunden. Diese Risiken können, unter Beachtung bestimmter Randbedingungen, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung quantifiziert und abgeschätzt werden. Für die Prüfung der Verteilungsfunktion sind abschließend sogenannte Anpassungs- bzw. Verteilungstests durchzuführen.⁶⁸⁰

Mittels **Schätzverfahren** werden die unbekannt Parameter der Grundgesamtheit (z. B. Mittelwert oder Modus), ausgehend von der vorliegenden Stichprobe abgeschätzt.⁶⁸¹ Die Auswertung erfolgt dabei mit analytischen Methoden in Form von Schätzfunktionen. Die am häufigsten verwendeten Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Momentenmethode

Bei der Momentenmethode werden die geschätzten Momente der Stichprobe den Momenten der Grundgesamtheit gleichgesetzt. Ein Anpassungstest, wie bei den nachfolgenden Methoden, erfolgt dabei nicht.⁶⁸²

Methode der kleinsten Quadrate

Eine Anpassung der geschätzten Funktion an die Werte der Stichprobe wird bei der Methode der kleinsten Quadrate (Regressionsanalyse) vorgenommen. Das Optimum ist dann erreicht, wenn die Summe der Quadrate der Abweichungen zwischen den empirischen Werten und den geschätzten Funktionswerten ein Minimum annimmt. Die Quadrierung der Abstände ist vorzunehmen, da bei Berücksichtigung der einfachen Abstände, diese sich gegenseitig aufheben können und somit das Ergebnis verfälschen würden.⁶⁸³

Maximum-Likelihood Methode⁶⁸⁴

Die Maximum-Likelihood Methode ist die allgemeinste Methode zur Schätzung der Parameter aus Stichproben. Dabei wird versucht, die Parameter so zu schätzen, dass die beobachteten Werte mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit eintreten und dadurch die Likelihood-Funktion ein Maximum annimmt. Vorausgesetzt wird dabei die Kenntnis über die Verteilungsfunktion des Parameters der Grundgesamtheit.⁶⁸⁵ Für den Fall, dass die Stichproben aus einer Normalverteilung stammen, stellt die Methode der kleinsten Quadrate einen Sonderfall der Maximum-Likelihood Methode dar.

⁶⁷⁹ vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 307

⁶⁸⁰ vgl. BOURIER (2011), S. 190 und S. 230

⁶⁸¹ vgl. BOURIER (2011), S. 231

⁶⁸² vgl. CZADO, SCHMIDT (2011), S. 75 ff.

⁶⁸³ vgl. CZADO, SCHMIDT (2011), S. 80; FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 55 ff.

⁶⁸⁴ Der Begriff „Likelihood“ (engl. Wahrscheinlichkeit) charakterisiert in diesem Zusammenhang die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert der Stichprobe, bei einem angenommenen Wert des zu schätzenden Parameters, eintritt. Anders als der bisherige Begriff der Wahrscheinlichkeit, bezieht sich ein „Likelihood“ nicht auf zukünftige, sondern auf zurückliegende reelle Ereignisse. [vgl. AUER, ROTTMANN (2010), S. 331]

⁶⁸⁵ vgl. BOURIER (2011), S. 235; GEORGII (2008), S. 195 f.; PAPULA (2011), S. 505

Die **Zeitreihenanalyse** beschäftigt sich mit Methoden zur Beschreibung von Daten, die in zeitlicher Reihenfolge (als Längsschnittdaten) vorliegen. Durch Zeitreihenanalysen können zukünftige Entwicklungen (Trends) mit Hilfe von Daten aus langen Zeitreihen abgeleitet werden. Die vorliegenden Zeitreihen sind dabei auf Gesetzmäßigkeiten hin untersuchen, die sich aus den Beobachtungswerten ableiten lassen.⁶⁸⁶ Grundtendenzen, Entwicklungen oder Niveauänderungen können dabei aus der zu ermittelnden Funktionsgleichung abgelesen werden. Zur Trendbeschreibung wird auf die Methode der kleinsten Quadrate oder dem gleitenden Durchschnitt zurückgegriffen. Der gleitende Durchschnitt entspricht dabei der Folge arithmetischer Mittelwerte aufeinanderfolgender Werte aus der Zeitreihe.⁶⁸⁷

A.1.5.2 Expertenbefragung

Die Expertenbefragung ist eine spezielle Methode, Wissen von Quellen zu erschließen, die über ein Spezialwissen zu einem entsprechenden Untersuchungsgegenstand verfügen.⁶⁸⁸ Diese sogenannten „Experten“ müssen nach LIEBOLD und TRINCZEK über einen deutlichen Wissensvorsprung hinsichtlich der zu untersuchenden Fragestellung verfügen.⁶⁸⁹ In der Literatur sind hierzu weitreichende Diskussionen über die Abgrenzung eines „Experten“ geführt worden, worauf an dieser Stelle verwiesen wird.⁶⁹⁰ Für diese Arbeit wird auf die Definition nach LIEBOLD, TRINCZEK bzw. auf die gleichlautende Beschreibung nach MEUSER, NAGEL zurückgegriffen.⁶⁹¹

Bei der Expertenbefragung handelt es sich um eine Methode, bei der mittels Interview (direkt) bzw. Fragebögen (indirekt) Antworten zu vorher festgelegten Fragestellungen gefunden werden können.⁶⁹² Nachteilig ist, dass dem Verfahren kaum ein strukturiertes Vorgehen zugrunde liegt.⁶⁹³ Dies bedeutet, dass für jede neu zu erörternde Frage, ein eigenes, speziell auf das Thema und die Experten zugeschnittenes Vorgehen entwickelt werden muss. Die Expertenbefragung umfasst in der Regel eine einmalige Fragerunde. Dadurch können gewünschte kognitive Prozesse für die Informationsgewinnung häufig nicht ausgelöst werden.⁶⁹⁴ Eine einheitliche, zusammenfassende Expertenmeinung ist aufgrund der Einmaligkeit der Befragung kaum zu realisieren.⁶⁹⁵ Aus diesem Grund ist eine abschließende Bewertung aller Ergebnisse für eine Konsensfindung (Parameterbestimmung) bzw. zur Bildung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen unerlässlich.

Trotz der rein subjektiven Einschätzungen über den Sachverhalt gehört die Expertenbefragung, aufgrund der Einfachheit und der schnellen Datengewinnung, heute zu den gängigsten Methoden der Datenerhebung.⁶⁹⁶

⁶⁸⁶ vgl. WEWEL (2010), S. 110

⁶⁸⁷ vgl. LIPPE (1993), S. 393

⁶⁸⁸ vgl. GLÄSER, LAUDEL (2010), S. 11

⁶⁸⁹ vgl. LIEBOLD, TRINCZEK (2009), S. 34

⁶⁹⁰ beispielsweise SCHÜTZ (1972); SPRONDEL (1979); HOPF (1982); BECK (1996); BOGNER, MENZ (2002); MEUSER, NAGEL (2009)

⁶⁹¹ vgl. LIEBOLD, TRINCZEK (2009), S. 34; MEUSER, NAGEL (2009), S. 466 ff.

⁶⁹² vgl. HÄDER (2009), S. 60

⁶⁹³ vgl. MEUSER, NAGEL (2009), S. 465

⁶⁹⁴ vgl. HÄDER (2009), S. 60

⁶⁹⁵ vgl. HÄDER (2009), S. 60

⁶⁹⁶ vgl. LIEBOLD, TRINCZEK (2009), S. 32

A.1.5.3 Delphi-Methode

Die Delphi-Methode ist eine spezielle Form der Expertenbefragung. Hierdurch lassen sich konkrete Werte für die zu untersuchenden Parameter aus wiederholenden Befragungen ableiten. Die Delphi-Methode eignet sich zur Prognose von Eintrittswahrscheinlichkeiten sowie zeitlichen (Eintrittszeitpunkt, Lebensdauern usw.) und finanziellen (Kosten, Preissteigerungen etc.) Auswirkungen bislang ungewisser Ereignisse.

Das grundsätzliche Vorgehen der klassischen Delphi-Methode beruht darauf, über mehrere, anonyme Befragungsrunden hinweg, Einschätzungen von Experten bzgl. der Fragestellung zu erheben. Zwischen den sich wiederholenden Fragerunden sind die jeweiligen Antworten zusammenzufassen und in den neu zu erstellenden Fragebogen zu integrieren. Die Experten erhalten so in der neuen Runde ein anonymes Feedback über die bisherigen Antworten. Durch Einbeziehung der unterschiedlichen Antworten in die erneute Fragerunde erfolgt eine Konkretisierung der Fragestellung bis zur finalen, konsensbasierenden Gruppenmeinung.⁶⁹⁷

Wie bei der reinen Expertenbefragung, unterliegen auch die durch die Delphi-Methode gewonnenen Ergebnisse der Subjektivität. Durch die Schärfung der Zielstellung wird jedoch versucht, eindeutigere Ergebnisse zu erhalten.⁶⁹⁸ Der wesentliche Vorteil liegt darin begründet, dass durch die Anonymität der Befragten, der Einfluss von situativen bzw. psychologischen Effekten (Überredung, Ablehnung, usw.) im Rahmen einer offen geführten Debatte bzw. einer Brainstorming-Sitzung vermieden wird.⁶⁹⁹

⁶⁹⁷ vgl. HÄDER (2009), S. 24 f.; PAETZ (2011), S. 62

⁶⁹⁸ vgl. HÄDER (2009), S. 23

⁶⁹⁹ vgl. AMMON (2009), S. 459

A.1.6 Bestimmung von Zufallszahlen

Die Bestimmung von Zufallszahlen ist das Kernelement der Monte-Carlo-Simulation.⁷⁰⁰ Grundsätzlich ist dabei auf reine bzw. echte Zufallszahlen zurückzugreifen. Diese entstammen zufälligen Prozessen, wie beispielsweise dem Roulettespiel oder dem physikalischen Phänomen des radioaktiven Zerfalls.⁷⁰¹ Aufgrund der zeitlich sehr aufwändigen Ermittlung und des begrenzten Umfangs, ist eine entsprechende Integration solcher Zahlen in einer computergestützten Berechnung praktisch kaum umsetzbar. Zudem ist für wissenschaftliche Untersuchungen eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse grundlegende Voraussetzung, die bei Verwendung echter Zufallsprozesse nicht gegeben ist.⁷⁰² Aus diesem Grund ist auf eine künstliche, rechnergestützte Bestimmung von Zufallszahlen zurückzugreifen. Durch die Verwendung entsprechender Algorithmen (sogenannte Zufallszahlengeneratoren⁷⁰³) können jedoch keine echten Zufallsvariablen bestimmt werden. Stattdessen handelt es sich hierbei um Pseudozufallszahlen, die nicht Zufallsprozessen, sondern streng deterministischen Rechenregeln entstammen.⁷⁰⁴ Um als Äquivalent zu reinen Zufallszahlen dienen zu können, werden an Pseudozufallszahlen bestimmte Anforderungen gestellt. Besonders aufgrund der Endlichkeit der bestimmbareren Zufallszahlen muss die verwendete Periodenlänge ausreichend groß sein, um eine wiederholende Simulation der Zahlen zu verhindern.⁷⁰⁵ Wesentliches Kriterium: Das Auftreten der Zufallszahlen hat zufällig, voneinander – scheinbar – unabhängig zu erfolgen.⁷⁰⁶

Das in dieser Arbeit zur Anwendung kommende Programm MICROSOFT EXCEL® verwendete bis zur Version 2002 den in Abs. A.1.6.1 vorgestellten linearen Kongruenzgenerator. Aufgrund der beschränkten Zahlfolge von einer Million Zahlenausprägungen (im Intervall [0,1]) wurde für die darauf folgenden Programmversionen der Algorithmus von B. A. WICHMAN und I. D. HILL implementiert. Die Zufallszahlen aus drei linear kongruenten Generatoren werden dabei summiert und die Zufallszahl aus dem Modus dieser Summe abgeleitet.⁷⁰⁷

A.1.6.1 Gleichverteilte Zufallszahlen

Standardmäßig wird auf gleichverteilte Zufallszahlen aus dem Intervall [0,1] zurückgegriffen. Das bedeutet, dass jede reelle Zahl zwischen 0 und 1 mit der gleichen Wahrscheinlichkeit eintritt. Diese Zufallszahlen u_j können mit Hilfe eines linear kongruenten Generators auf Basis des folgenden Algorithmus erzeugt werden.⁷⁰⁸

$$x_j = (ax_{j-1} + c) \bmod m \quad (\text{A.1.30})$$

⁷⁰⁰ vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 109; FISHMAN (1996), S. 587

⁷⁰¹ vgl. STEIGER (2009), S. 72; ZIO (2013), S. 20

⁷⁰² vgl. FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 92; SOBEL (1991), S. 33

⁷⁰³ vgl. SCHINDEL (1977), S. 139

⁷⁰⁴ vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 109; MÜLLER-GRONBACH, NOVAK, RITTER (2012), S. 2; FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 91 f.

⁷⁰⁵ vgl. HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 26

⁷⁰⁶ vgl. SCHINDEL (1977), S. 140

⁷⁰⁷ vgl. MICROSOFT (o. A.)

⁷⁰⁸ vgl. BRANDT (2013), S. 43; SCHNEEWEISS (1969), S. 140

Jede in dieser Form ermittelte Zufallszahl x_j wird durch ihren Vorgänger x_{j-1} sowie den Konstanten a (Multiplikator), c (Inkrement) und m (Modulus)⁷⁰⁹ bestimmt. Für $c = 0$ handelt es sich um einen multiplikativen Kongruenzgenerator.⁷¹⁰

Die zugehörige normierte reelle Zufallszahl u_j aus dem Einheitsintervall $[0,1]$ wird wie folgt ermittelt:⁷¹¹

$$u_j = \frac{x_j}{m} \quad (\text{A.1.31})$$

Weitere lineare Zufallsgeneratoren sowie erforderliche Test zur Güteprüfung der Zufallsvariablen (Korrelationstest, Gleichverteilungstest usw.) sind der einschlägigen Literatur zu entnehmen.⁷¹²

A.1.6.2 Nicht gleichverteilte Zufallszahlen

Eine Risikoanalyse enthält nur in Ausnahmefällen ausschließlich gleichverteilte Zufallsvariablen. Um andere Verteilungsfunktionen (Dreiecksverteilung, Normalverteilung usw.) für eine Monte-Carlo-Simulation nutzbar zu machen, ist eine Transformation der gleichverteilten Zufallsvariablen in die vorgesehene Verteilung erforderlich.⁷¹³

Die einfachste Form der Transformation ist die Inversionsmethode, bei der mit Hilfe der Umkehrfunktion (Invers) $F^{-1}(x)$ aus der gleichverteilten Zufallszahl u_j eine Zahl x_j aus der gegebenen Verteilungsfunktion $F(x)$ abgeleitet wird (Abbildung A.1.17).⁷¹⁴

$$F(x_j) = u_j \quad \leftrightarrow \quad x_j = F^{-1}(u_j) \quad (\text{A.1.32})$$

Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass jeder Wahrscheinlichkeitsverteilung eine Verteilungsfunktion $F(x)$ mit einem Wertebereich von 0 bis 1 zugrunde liegt.⁷¹⁵

Für die Anwendung der Inversionsmethode ist es erforderlich, die Umkehrfunktion der Wahrscheinlichkeitsdichtfunktion bilden zu können. Problematisch ist dies beispielsweise für Normalverteilungen, deren Invers nicht unmittelbar bestimmt werden kann.⁷¹⁶

Für entsprechende Verteilungen existieren bereits unterschiedliche numerische Lösungsansätze, wie z. B. das Box-Muller-Verfahren für Normalverteilungen. Deren Anwendbarkeit ist vielfach belegt, so dass an dieser Stelle auf die einschlägige Literatur verwiesen werden kann.⁷¹⁷

⁷⁰⁹ $\text{mod } m$ bedeutet dabei, dass der Ausdruck $(ax_{j-1} + c)$ durch m dividiert wird und der sich daraus ergebende Rest, für die weitere Rechnung Verwendung findet. Beispiel: $7 \text{ mod } 3 = 1$ ($7/3 = 2$ Rest 1).

vgl. BRAND (2013), S. 43

⁷¹⁰ vgl. FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 92

⁷¹¹ vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 110; SCHNEEWEISS (1969), S. 140

⁷¹² bspw. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 111 ff.; BRANDT (2013), S. 42 ff.; FISHMAN (1996), S. 587 ff.; HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 27 ff.; ZIO (2013), S. 21 f.

⁷¹³ vgl. BLOBEL, LOHRMANN (2012), S. 113; HENGARTNER, THEODORESCU (1978), S. 32 f.

⁷¹⁴ vgl. BRANDT (2013), S. 54; FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 95 f.; BEDFORD, COOKE (2001), S. 327; ZIO (2013), S. 22 ff.

⁷¹⁵ vgl. FRÜHWIRTH, REGLER (1983), S. 95; STEIGER (2009), S. 75

⁷¹⁶ vgl. BRANDT (2013), S. 56

⁷¹⁷ vgl. BRANDT (2013), S. 60 f.; MÜLLER-GRONBACH, NOVAK, RITTER (2012), S. 92 ff.

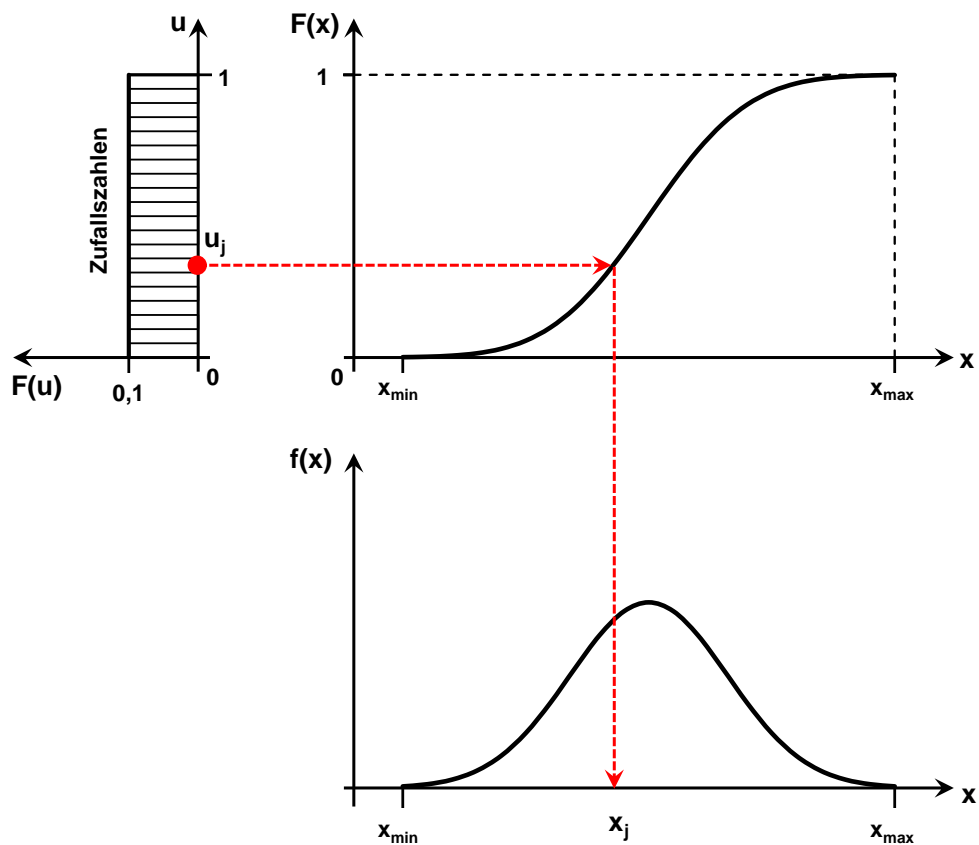


Abbildung A.1.17: Transformation einer gleichverteilten Zufallszahl mit der Inversionsmethode⁷¹⁸

⁷¹⁸ in Anlehnung an BRANDT (2013), S. 54; STEIGER (2009), S. 76; WIGGERT (2009), S. 146

A.2 Erhebung der Attribute für die Module des Mustertunnels

Zur Bestimmung der Lebenszykluskosten sind die Attribute für die einzelnen Module des Mustertunnels zu bestimmen. Dabei wird das Tunnelbauwerk mit seinen beiden Röhren betrachtet. Bei dem verwendeten Beispiel handelt es sich um ein fiktives Bauwerk, so dass nur bedingt auf reale Größen zurückgegriffen werden kann. Die eruierten Daten erheben deshalb keinen Anspruch auf Vollständigkeit und Richtigkeit.

A.2.1 Baugruppe Innenschale

Der Tunnelinnenschale als auskleidendes Element kommt im Wesentlichen eine statische Funktion zur Gewährleistung der Standsicherheit zu. In Wechselwirkung mit dem Gebirge bzw. Baugrund sind auftretende Einwirkungen (Gebirgsdruck, Wasserdruck usw.) für das Bauwerk schadfrei aufzunehmen und abzuleiten. Dies ist gleichbedeutend mit der Sicherstellung einer ausreichenden Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich der Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit während einer festgelegten Zeitdauer. Darüber hinaus kann der Innenschale eine abdichtende Funktion bzw. eine Schutzfunktion für die Abdichtung zugewiesen werden. Weitergehende Funktionen umfassen die Aufnahme von Tunneleinbauten (Tunnelausrüstung, Zwischendecken usw.) und die optische Gestaltung der sichtbaren Oberfläche.⁷¹⁹

Im vorliegenden Fall werden die Einwirkungen aus dem Tunnelvortrieb durch die bergseitige Sicherung mittels Spritzbeton aufgenommen. Bis zum Einbau der Tunnelinnenschale ist dabei in vielen Fällen die Kraftumlagerung im Gebirge zum Großteil abgeschlossen, so dass die Innenschale entsprechend wirtschaftlicher dimensioniert werden kann. Aufgrund der temporären Wirkung ist die Außenschale den Bauhilfskonstruktionen zugewiesen. Die dauerhafte Ableitung der Einwirkungen erfolgt über das Gewölbe und die geschlossene Tunnelsohle ins umgebende Gebirge. Gewölbe und Sohle übernehmen dabei differierende Aufgaben. Zusammen mit der fehlenden Zugänglichkeit der Tunnelsohle und der daraus resultierenden unterschiedlichen Leistungen und Kosten bedingt dies eine getrennte Erfassung von Gewölbe und Sohle in eigenständigen Modulen (Abbildung A.2.18).

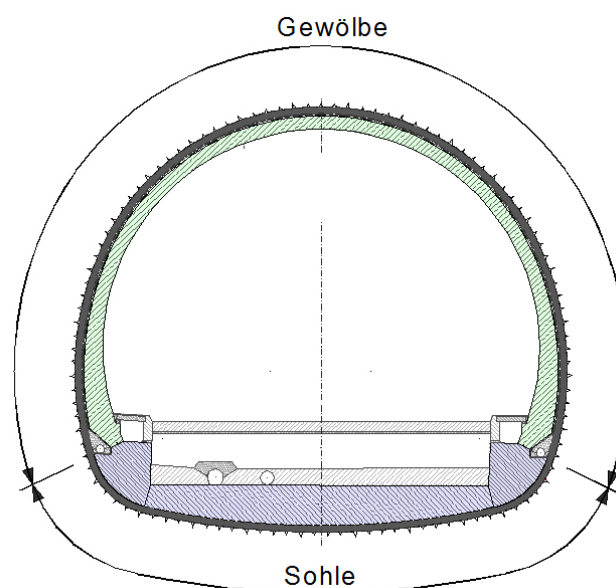


Abbildung A.2.18: Modul-Einteilung Innenschale – Gewölbe und Sohle

⁷¹⁹ vgl. GEHLEN, MAYER, GREVE-DIERFELD (2011), S. 231; ÖBV (2012), S. 33; ÖBV (2014)A, S. 2

A.2.1.1 Modul Gewölbe

A.2.1.1.1 Beschreibung

Das Tunnelgewölbe umfasst den oberen, sichtbaren Bereich der Tunnelinnenschale, in etwa ab Höhe der Fahrbahn. Am Übergang zur Sohle ist in der Arbeitsfuge ein Quelfugenband vorgesehen (Abbildung A.2.19).

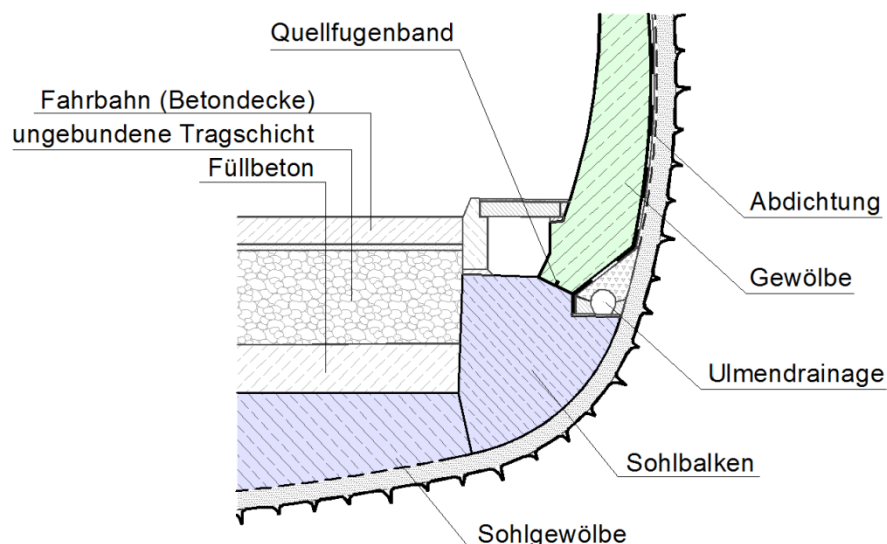


Abbildung A.2.19: Regeldetail Anschluss Sohle – Gewölbe

A.2.1.1.2 Definition und Abgrenzung des Moduls

Das Tunnelgewölbe als Teil der Tunnelinnenschale übernimmt die technisch-funktionale Aufgabe der dauerhaften Aufnahme und Ableitung von auftretenden Einwirkungen (Gebirgsdruck, Wasserdruck usw.). Darüber hinaus kommt dem Tunnelgewölbe eine gestalterische Funktion zu. Es bildet den Hintergrund für die Sehaufgabe des Tunnelnutzers und beeinflusst damit ganz wesentlich die Kontraststärke zum Erkennen von Gegenständen bzw. Gefahrensituationen. Damit verbunden sind spezielle Anforderungen an die Reflexionseigenschaften. Im Gegensatz zur Tunnelsohle erfordert die Aufrechterhaltung der vorgesehenen Eigenschaften zusätzliche Leistungen (z. B. Reinigung). Beim Einsatz von Beschichtungen dient das Gewölbe als Trägerelement und ist entsprechend dafür vorzubereiten. Dabei übernimmt die Beschichtung die gestalterische Funktion.

Funktionale Unabhängigkeit

Zur Erzielung einer ausreichenden Standsicherheit als funktionale Aufgabe, sind die einzelnen Elemente hinsichtlich der auftretenden Einwirkungen zu dimensionieren. Zusätzliche Elemente hierzu sind nicht erforderlich. Des Weiteren übernimmt das Gewölbe eine gestalterische Aufgabe zur Unterstützung der Sehaufgabe des Tunnelnutzers.

Physische Unabhängigkeit

Trotz der scheinbar dauerhaften Verbindung von Sohle und Gewölbe kann durch den zeitlich getrennten Einbau der beiden Bereiche eine physische Unabhängigkeit angenommen werden. Die Ausrüstungsgegenstände sind über lösbare Schraubverbindungen (Dübel, Kontaktplatten usw.) an der Innenschale befestigt.

Integrität

Das Modul umfasst alle zur Erzielung der Funktionalität erforderlichen Elemente. Eine Aggregation zu einem übergeordneten Untersuchungsrahmen ist durch die Eigenständigkeit gegeben.

A.2.1.1.3 Elemente

Das Tunnelgewölbe besteht im Wesentlichen aus dem sichtbaren Bereich der Tunnelinnenschale – in etwa ab oberhalb der Fahrbahnebene (Abbildung A.2.18). Hauptbaustoff ist Stahlbeton (C 25/30) mit Bewehrungseinlagen (BSt 500 S/M). In den Blockfugen sind Block-, in den Arbeitsfugen sind Arbeitsfugenbänder (Quellfugenbänder usw.) angeordnet (Abbildung A.2.19). Zusätzlicher Bestandteil sind Einbauteile zur Befestigung von Ausrüstungsgegenständen (Beschilderung, Kabelbrücken usw.).

A.2.1.1.4 Prozesse

Neben den für die Herstellungsphase relevanten Prozessen der Planung und Umsetzung, sind für das Tunnelgewölbe auch während der Nutzungsphase unterschiedliche Prozesse zur Aufrechterhaltung der Gebrauchstauglichkeit erforderlich. Insbesondere die Anforderungen an die Standsicherheit und an den Zustand der Oberfläche bedingen eine Vielzahl unterschiedlicher Leistungen.

Zur Gewährleistung der notwendigen Reflexionseigenschaften sowie zur optischen Aufhellung der Tunnelwände ist regelmäßig eine Reinigung der Tunnellaibung vorzunehmen. Diese dient auch zur Unterstützung der notwendigen Zustandsüberprüfung, die ebenfalls in festgelegten Zeitabständen zu erfolgen hat.

Eine Instandsetzung der Tunnelinnenschale ist entsprechend den Regelungen für die Bemessung der Dauerhaftigkeit prinzipiell nicht vorzusehen. Das Bauwerk ist grundsätzlich so zu dimensionieren, dass eine Schädigung nur in dem Umfang auftreten kann, dass die Gebrauchstauglichkeit zu keinem Zeitpunkt gefährdet ist.⁷²⁰ Sind vor Ablauf der vorgesehenen Nutzungsdauer dennoch Instandsetzungsarbeiten notwendig, ist dies in vielen Fällen auf mangelhafte Leistungen im Zuge der Planung, der Ausführung bzw. der Nutzung zurückzuführen. Häufig auch deshalb, weil das Wissen über beobachtete Schäden und deren Ursachen erst Jahre später vorlag.⁷²¹

Eine (geplante) Instandsetzung, wie beispielsweise bei Brückenkappen mit einer begrenzten Lebensdauer von 20-25 Jahren, ist für Tunnelbauwerke nicht vorgesehen.⁷²² Eine Berücksichtigung zukünftiger Instandsetzungsmaßnahmen bereits zum Neubau wäre vollständig konträr zu den Entwurfsgrundsätzen. Es besteht allerdings die Möglichkeit Instandsetzungsarbeiten im Zuge des Lebenszyklus von Bauwerken, durch Reduzierung der Bauwerks- und Materialwiderstände bewusst in Kauf zu nehmen. Die damit verbundenen geringeren Investitionskosten müssten dann mit den erforderlichen Instandsetzungskosten in einem eigenständigen Instandsetzungskonzept Berücksichtigung finden.

Bei älteren Bauwerken lag der Fokus verstärkt auf dem Nachweis der Standsicherheit. Die Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einwirkungen, wie beispielsweise Chloride, wurde z. T. vernachlässigt oder erst später in die Bemessung einbezogen.⁷²³ Die Bewertung der

⁷²⁰ vgl. GEHLEN, MAYER, GREVE-DIERFELD (2011), S. 231 ff.

⁷²¹ vgl. NAUMANN, FRIEBEL (2000), S. 815 f.; GEHLEN, MAYER, GREVE-DIERFELD (2011), S. 232

⁷²² vgl. Lebensdauern von Brückenkappen nach HOLST (2005), S. 27

⁷²³ vgl. GEHLEN, GREVE-DIERFELD (2013), S. 225

Dauerhaftigkeit basierte dabei auf deskriptiven Modellen.⁷²⁴ Dementsprechend zeigen diese Bauwerke eine höhere Anfälligkeit für Schädigungen an Beton und Bewehrung.

Für den vorliegenden Mustertunnel werden zur Darstellung der Funktionalität des Modells, Instandsetzungsmaßnahmen berücksichtigt. Dazu empfiehlt es sich die notwendigen Attribute (Kosten und Zeit) von bereits durchgeführten Leistungen an ähnlichen Bauwerken abzuleiten oder durch Abschätzung der erforderlichen Leistungen zu erheben.

Kleinere (kosmetische) Ausbesserungsarbeiten, z. B. verpressen eines einzelnen Risses, sind dem Prozess der Wartung zu zuordnen. Umfang und Häufigkeit ist, vergleichbar mit den Instandsetzungsarbeiten, aus vorhandenen Bauwerken abzuleiten.

Mit der angestrebten Nutzungsdauer von ca. 100 Jahren ist die Tunnelinnenschale das prägende Element für die Bestimmung eines Lebenszyklus für Tunnelbauwerke. Daraus ist abzuleiten, dass durch eine Erneuerung bzw. Modernisierung der Innenschale, ein neuer Zyklus zu betrachten wäre. Da an dieser Stelle lediglich ein einziger Lebenszyklus untersucht werden soll, sind die Prozesse Erneuerung und Modernisierung nicht von Relevanz. Des Weiteren ist der Prozess der Versorgung obsolet, da eine Versorgung mit Energie o. ä. während der Nutzungsphase nicht erforderlich ist. Die Verwertungsphase und die darin anfallenden Prozesse bleiben für den angestrebten Untersuchungsrahmen ebenfalls außen vor (Tabelle A.2.1).

Tabelle A.2.1: Relevante Prozesse für das Modul „Gewölbe“

Herstellung		Nutzung							Verwertung
Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Modernisierung	Revitalisierung
X	X	-	X	X	X	X	-	-	-

A.2.1.1.5 Leistungen

Planung:

Die Leistungen beinhalten Planung, Dimensionierung und Dokumentation im Bereich der Objekt- sowie Tragwerksplanung. Zusätzlich umfassen die Planungsleistungen Aufwendungen für die bauherrninterne Verwaltung, die Prüfung der Planung sowie die Bauüberwachung und das Projektmanagement.

Umsetzung:

Die Herstellung des Tunnelgewölbes erfolgt durch Einbau der Bewehrung, Schalung, Betonage und Nachbehandlung, inkl. Firstspaltverpressung und weiterer Nebenleistungen (z. B. Bauleitung, Koordination, Vermessung).

Reinigung:

Die Tunnelwände werden regelmäßig bis zu einer Höhe von 3,00 m über der Fahrbahn gereinigt. Für den darüberliegenden Gewölbebereich wird festgelegt, dass dieser nur bei jedem dritten Reinigungsvorgang einzubeziehen ist.

Die Tunnelreinigung erfolgt mechanisch mittels Reinigungsfahrzeug und rotierenden Bürsten. Schwer zugängliche Bereiche sind händisch, unter Zuhilfenahme einer Hochdrucklanze, zu reinigen. Zur Unterstützung der Reinigungswirkung erfolgt vorab ein „Einweichen“ der zu reinigenden Fläche durch Aufbringen eines neutralen Reinigungsmittels.

⁷²⁴ vgl. MÜLLER, VOGEL (2008), S. 52

Inspektion:

Im Rahmen der Inspektion erfolgt eine Überwachung des Bauwerkszustandes hinsichtlich Zuverlässigkeit und Verkehrssicherheit. Es gilt Mängel bzw. mögliche Schäden frühzeitig zu erkennen, so dass durch zeitnahe Maßnahmen größere Auswirkungen (Kosten, Sicherheit) vermieden werden können. Gemäß RVS 13.03.31 sind folgende Inspektionen vom Erhaltungsverpflichteten zu erbringen:⁷²⁵

Laufende Überwachung:

Durch den Streckendienst sind bei turnusmäßigen Kontrollfahrten sichtbare Schäden bzw. Mängel aufzunehmen. Sollten Veränderungen festgestellt werden, sind die verantwortlichen Stellen zu informieren. Ein Protokoll ist nicht anzufertigen.

Kontrolle:

Bei der Kontrolle werden Veränderungen im Erhaltungszustand gegenüber dem letzten Inspektionsergebnis durch sachkundiges Personal erhoben und bewertet. Die Kontrolle beschränkt sich auf eine visuelle Prüfung der baulich konstruktiven Teile des Tunnelbauwerkes. Hilfsmittel, wie z. B. Gerüste, sind zur Kontrolle nicht erforderlich. Die Ergebnisse sind zu protokollieren.

Prüfung:

Bei der Prüfung erfolgt neben der Inaugenscheinnahme auch eine Beurteilung des Tragverhaltens des Bauwerkes sowie der baulich konstruktiven Teile. Der Zustand der einzelnen Bauteile und des Gesamtbauwerkes ist mit Hilfe von Zustandsnoten zu bewerten und zu dokumentieren. Zur Schadensbehebung sind geeignete Maßnahmen vorzuschlagen.

Die Prüfung umfasst die Inaugenscheinnahme der Bauteile, eine Messung schädlicher Risse sowie das stichprobenweise Abklopfen gefährdeter Bereiche. Hierfür ist auf spezielle Gerüste, Besichtigungsgeräte und Prüfwerkzeuge zurückzugreifen.

Wartung:

Umfang und Häufigkeit der Wartungsarbeiten am Tunnelgewölbe werden wesentlich durch das Bauwerksalter geprägt. Dabei entscheidend ist die Betongüte (Widerstand) sowie Art und Intensität der Einwirkungen.⁷²⁶ Die Leistungen der Wartung umfassen u. a. Ausbessern von Fehlstellen, Abtrag von schadhafte Beton zum Öffnen und Ausarbeiten örtlicher Fehlstellen durch Stemmen, Entfernen von Algen, Bewuchs, Ablagerungen und dünnen Anstrichen mittels Hochdruckreinigen, Verfüllen von Rissen mittels Tränkung, Injektion zum dehnfähigen bzw. kraftschlüssigen Verbinden.⁷²⁷

Instandsetzung:

Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen sowie der sehr langen Prognosezeiträume sind Art, Umfang und Häufigkeit von Instandsetzungsarbeiten kaum prognostizierbar. Aus der Historie heraus wird jedoch eine zweimalige Instandsetzung, auch aufgrund der nicht vorgesehenen Beschichtung, berücksichtigt.⁷²⁸

⁷²⁵ vgl. FSV (2013), S. 3 ff.

⁷²⁶ Verifizierte Aussagen über den Leistungsumfang und die Häufigkeit liegen bislang nicht vor, so dass an dieser Stelle eine eigenständige Abschätzung erfolgen muss. Dazu wird auf die Bestimmung der Kosten (Abs. A.2.1.1.6) und der Zeitlichen Parameter (Abs. A.2.1.1.7) für die Wartung verwiesen.

⁷²⁷ vgl. HILLEMEIER ET AL. (2011), S. 367 ff.

⁷²⁸ In ÖBV (2014)B; Seite 3, Tabelle 1-1 sind die Leistungen für die Instandsetzung von Stahlbetonbauwerken zusammengefasst.

Die zu bearbeitende Betonfläche für die erstmalige Instandsetzung wird mit 25 % der Tunnelwand bis 3,00 m Wandhöhe über der Fahrbahn abgeschätzt. Die schadhafte Betonfläche, bei der auch eine Schädigung der Bewehrung vorliegt, wird mit 4,0 % angesetzt.

Für die zweite Instandsetzung wird eine Bearbeitung von 50 % der Tunnelwandfläche bis 3,00 m Wandhöhe über der Fahrbahn prognostiziert. Der Anteil der schadhafte Betonfläche, bei der auch die Bewehrung aufbereitet werden muss, wird dabei mit 8 % angenommen.

Zur Abschätzung der Leistungen wird auf die Arbeitsschritte einer konventionellen Betoninstandsetzung nach GÜNTER zurückgegriffen. Dabei sind folgende Leistungsschritte – abhängig von der zu sanierenden Betonfläche und des Schädigungsgrades – zu erbringen:⁷²⁹

- Lokalisieren der Reparaturstellen;
- Entfernen schadhafte Betonflächen mittels Hochdruckwasserstrahl;
- Freilegung und Aufbereitung geschädigter Bewehrung;
- Wiederherstellung und Reprofilierung der Betonoberfläche.

A.2.1.1.6 Kosten

Die Bestimmung der Kosten erfolgte auf Basis eigenständiger Kalkulationen für die einzelnen Leistungen. Die Eingangsgrößen werden dabei (soweit möglich) aus realen Projekten oder vorliegenden Literaturwerten und Expertenaussagen abgeleitet. Alternativ erfolgt eine realitätsnahe Abschätzung. Zur Kostenermittlung werden beide Tunnelröhren einbezogen (Abs. A.3.1).

Planung:

Die Bestimmung der Planungskosten basiert auf der deutschen Honorarordnung (HOAI). Dazu werden die Fachgebiete Objektplanung Ingenieurbauwerke (§ 44) und Tragwerksplanung (§ 52) einbezogen.⁷³⁰ Die Kosten für die Prüfung der Tragwerksplanung werden über die „Landesverordnung über Prüfsachverständige für Standsicherheit“ bestimmt.⁷³¹ Die Verwaltungskosten werden durch Abschätzung des Personalbedarfs berechnet (Abs. A.3.1.1).⁷³²

Planungs-, Prüf- und Verwaltungskosten: 1.692.000,00 €

Umsetzung:

Die Kosten für die Herstellung des Tunnelgewölbes werden über eine Kalkulation der erforderlichen Leistungen bestimmt (Abs. A.3.1.2).

Umsetzung Tunnelgewölbe: 10.446.200,00 €

⁷²⁹ vgl. GÜNTER (2007), S. 99 ff.

⁷³⁰ vgl. HOAI (2013), § 44 bzw. § 52

Für die anrechenbaren Kosten zur Bestimmung der Planungskosten wird auf die Umsetzungskosten zurückgegriffen. Dabei wird ein pauschaler Abschlag einbezogen um berücksichtigen zu können, dass es sich hier nur um Teilleistungen für die Gesamtplanung handelt.

⁷³¹ vgl. MJV (2007), § 10

⁷³² In den Verwaltungskosten ist ein Zuschlag für die Gemeinkosten in Höhe von 20 % berücksichtigt. vgl. BMV (2001), S. 45; BMVBS (2013)B, S. 65

Reinigung:

Mit Hilfe der Leistungsdaten einer Tunnelreinigungsmaschine und der Abschätzung der weiteren Leistungen werden die Kosten für eine Teilreinigung (bis 3,00 m Wandhöhe) (Abs. A.3.1.3) sowie eine vollständige Reinigung des Tunnelgewölbes bestimmt (Abs. A.3.1.4).⁷³³ Bei der maschinellen Reinigung wird ein Zuschlag von 20 % für Nischen, Umsetzen, Wasseraufnahme usw. berücksichtigt.

Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe):	5.900,00 €
Reinigung (vollständiges Gewölbe):	13.400,00 €

Inspektion:

Die Kosten für die Prüfung werden auf Basis der Richtlinie zur Bestandprüfung (RVS 06.03.32) berechnet (Abs. A.3.1.7).⁷³⁴ Über den gesamten Nutzungszeitraum wird dabei von einem „ausreichenden“ Bauwerkszustand ausgegangen. Zusätzlich wird der Verwaltungsaufwand einbezogen.⁷³⁵

Die Leistungen zur Bauwerkskontrolle besitzen einen deutlich geringeren Umfang, so dass die Kosten abgeschätzt werden müssen. Eine eigenständige Richtlinie, wie für die Bauwerksprüfung, liegt hierzu nicht vor. Zur Abschätzung wird deshalb auf die Erkenntnisse von TATHOFF und NEUSS Bezug genommen, wonach der Aufwand gegenüber der Prüfung lediglich ca. 30 % beträgt (Abs. A.3.1.6).⁷³⁶

Die Aufwendungen für die Laufende Überwachung werden über den zeitlichen Aufwand und die daraus resultierenden Personalkosten abgeleitet (Abs. A.3.1.5).

Inspektion – Laufende Überwachung:	200,00 €
Inspektion – Kontrolle:	35.500,00 €
Inspektion – Prüfung:	115.800,00 €

Wartung:

Die Kosten für die Wartungsarbeiten des Tunnelgewölbes werden über den jährlichen Aufwand abgeschätzt. Zusätzlich werden noch Kosten für Geräte und Material einbezogen (Abs. A.3.1.8).

Wartung:	4.500,00 €
----------	------------

Aufgrund des voranschreitenden Alterungsprozess und der damit einhergehenden Zunahme an schadhafte Stellen, wird eine progressive Zunahme der Kosten bis zur Instandsetzung der Innenschale angesetzt (Abbildung A.2.20). Der Ansatz erfolgt konform zum Rückgang des Bauwerkszustandes.⁷³⁷

Die Umsetzung basiert auf folgender Formel:⁷³⁸

$$y = ax^4 + b \quad \text{(A.2.33)}$$

⁷³³ vgl. MULAG (2012), S. 9

⁷³⁴ vgl. FSV (2013)B

⁷³⁵ Der Verwaltungsaufwand wird mit 20 % des zeitlichen Aufwandes für die Tunnelprüfung abgeschätzt. vgl. BMVBS (2013)B, S. 65

⁷³⁶ vgl. TATHOFF, NEUSS (2002), S. 41 – Die Ansätze basieren auf der Bauwerksprüfung von Brücken.

⁷³⁷ siehe hierzu AHRENS ET AL. (2013), insbesondere Bild 4, S. 23

⁷³⁸ Die Funktion vierten Grades wurde gewählt, da hierdurch ein sehr langsamer Anstieg der Kosten simuliert werden kann und gleichzeitig bei vorangeschrittenem Bauwerksalter die Kosten schnell ansteigen.

- Dabei gilt:
- y = Kostengröße im jeweiligen Betrachtungsjahr (x)
 - x = Betrachtungsjahr
 - a = Faktor – abhängig von der Zeitdauer zwischen zwei Instandsetzungsmaßnahmen und der Differenz zwischen maximaler und minimaler Kostenausprägung
 - b = minimale Kostenausprägung (unmittelbar nach Errichtung bzw. Instandsetzung)

Für die Wartung wird eine maximale Kostenausprägung bis zur Instandsetzung vom dreifachen Minimalwert abgeschätzt ($3 \times 4.500 \text{ €} = 13.500 \text{ €}$) (Abbildung A.2.20).

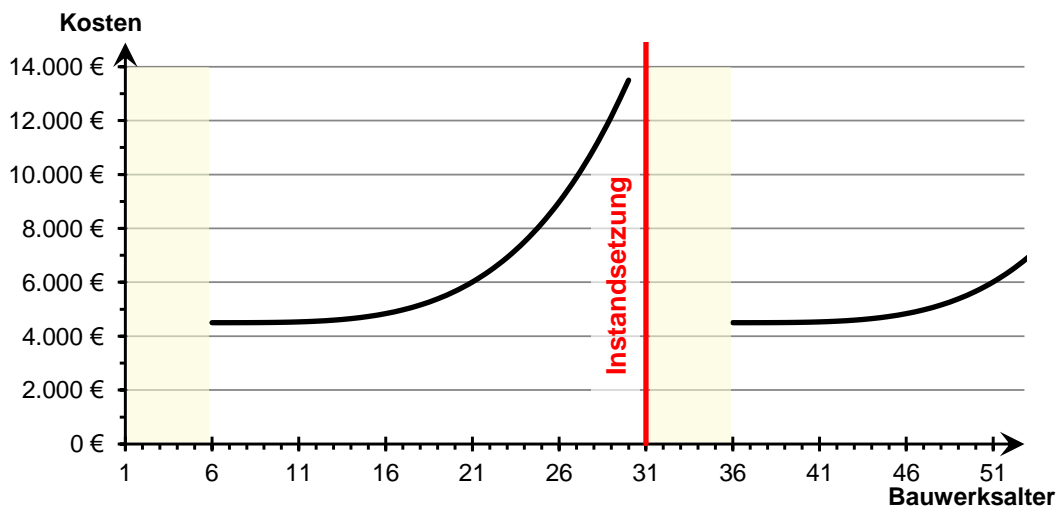


Abbildung A.2.20: Kostenverlauf Wartung – Tunnelgewölbe

Instandsetzung:

Untersuchungen in Betrieb befindlicher Bauwerke sowie die Literaturrecherche zeigen, dass bisher die Kosten für Instandsetzungsarbeiten nicht bzw. nur sehr unstrukturiert erhoben wurden. Eine verursachungsgerechte Zuordnung der Kosten zu den einzelnen Leistungen ist deshalb bislang nicht möglich.⁷³⁹

Zur Ermittlung der Kosten wird stattdessen, analog zur Erhebung der Leistungen, auf die von GÜNTER veröffentlichten Kosten für die Instandsetzung zurückgegriffen.⁷⁴⁰ Datenbasis ist dabei das Jahr 2004. Zur Angleichung der Preise auf das Betrachtungsjahr 2014 wird ein Preisanstieg seit 2004 von 23,5 % berücksichtigt.⁷⁴¹

Zur Erzielung der angestrebten Nutzungsdauer von 100 Jahren werden zwei Instandsetzungen am Tunnelgewölbe eingeplant. Der voranschreitenden Verschlechterung des Bauwerkszustandes wird dabei Rechnung getragen (Abs. A.3.1.9 und Abs. A.3.1.10).

1. Instandsetzung:	2.945.700,00 €
2. Instandsetzung:	6.139.800,00 €

⁷³⁹ Untersucht wurden verschiedene Bauwerke anhand deren Bauwerksbücher (SIB).

POPP kommt dabei zu dem gleichen Ergebnis, dass die bisherigen Daten für eine Lebenszykluskostenrechnung nicht ausreichend erfasst wurden. [vgl. POPP (2013), S. 120 f.]

⁷⁴⁰ vgl. GÜNTER (2007), S. 99 ff.

⁷⁴¹ Die Daten zur Bestimmung der Preissteigerung in Österreich wurden der Datenbank „Statistik Austria“ entnommen [http://statcube.at], abgerufen am 16.10.2014.

Zur Bestimmung der Preissteigerung wurde auf Leistungen für den Brückenbau abgestellt. Indizes für Tunnelbauwerke werden in der Datenbank bislang nicht erfasst.

A.2.1.1.7 Zeitliche Parameter

Planung & Umsetzung:

Der Anfallszeitpunkt für die Kosten der Planung und Umsetzung wird per Definition auf den Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung (Ende Herstellungsphase – Beginn Nutzungsphase) gelegt.

Reinigung:

Die Reinigung der Tunnellaubung erfolgt einmal jährlich sowie unmittelbar vor der Tunnelinspektion.⁷⁴² Sie ist außerhalb der Frostperiode durchzuführen. Die Tunnelreinigung erfolgt grundsätzlich bis zu einer Wandhöhe von 3,00 m. Im Abstand von 3 Jahren sowie unmittelbar vor der Tunnelinspektion (Kontrolle bzw. Prüfung) ist zusätzlich das darüberliegende Gewölbe zu reinigen.

Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe):	1x jährlich
Reinigung (vollständiges Gewölbe):	alle 3 Jahre

Inspektion:

Die Häufigkeit der unterschiedlichen Inspektionsmaßnahmen ist durch die Richtlinie RVS 13.03.31 vorgegeben.⁷⁴³

Laufende Überwachung

Die laufende Überwachung hat mindestens alle 4 Monate zu erfolgen.

Kontrolle

Die Kontrolle ist turnusmäßig alle zwei Jahre, bzw. nach außergewöhnlichen Ereignissen durchzuführen.

Prüfung

Die erste Prüfung hat vor Ablauf der Gewährleistungsfrist zu erfolgen. Sofern keine anderslautenden Anweisungen der verantwortlichen Stelle vorliegen, ist nach der Erstprüfung ein Turnus von zwölf Jahren einzuhalten. Zusätzlich ist vor jeder Instandsetzung eine eingehende Prüfung und Zustandserhebung durchzuführen.

Inspektion – Laufende Überwachung:	3 x jährlich
Inspektion – Kontrolle:	alle 2 Jahre
Inspektion – Prüfung:	alle 12 Jahre bzw. vor der Instandsetzung

Wartung:

Für die Leistungen zur Wartung der Tunnelinnenschale liegen keine Richtlinien bzw. Wartungspläne vor. Die Häufigkeit der Wartung wird deshalb als jährliche Maßnahme angesehen, beginnend fünf Jahre nach der Fertigstellung bzw. der Instandsetzung (Abbildung A.2.20).

Wartung:	1 x jährlich
----------	--------------

⁷⁴² vgl. FSV (2013)A, S. 7; FGSV (2011)

⁷⁴³ vgl. FSV (2013)A, S. 3 ff.

Instandsetzung:

Eine Instandsetzung der Tunnelinnenschale ist aufgrund der erforderlichen Dauerhaftigkeit über die geplante Nutzungsdauer nicht vorgesehen. Allerdings zeigt eine kurze (nicht abschließende) Recherche, dass umfangreiche Sanierungsmaßnahmen immer wieder erforderlich sind. Welche Leistungen dabei notwendig wurden, konnte nicht erhoben werden. Die Auswertung zeigt jedoch, dass im Schnitt nach etwa 30 Jahren eine Sanierung der Betonstruktur erforderlich wurde (Tabelle A.2.2). Auf Basis dieser Erfahrungen werden Instandsetzungsarbeiten am Gewölbe nach 30, respektive 60 Jahren berücksichtigt.

1. Instandsetzung: nach 30 Jahren
 2. Instandsetzung: nach 60 Jahren

Tabelle A.2.2: Auswertung des Bauwerksalters bis zur Instandsetzung der Innenschale⁷⁴⁴

Nr.	Bezeichnung	Land	Baujahr / Eröffnung	Jahr der Instandsetzung	Alter bei Instandsetzung
1	Hiefnertunnel	AUT	1974	2004	30 Jahre
2	Offenauertunnel	AUT	1974	2004	30 Jahre
3	Katschbergtunnel	AUT	1974	2008	34 Jahre
4	Bosrocktunnel	AUT	1983	2013	30 Jahre
5	Tanzenbergtunnel	AUT	1985	2011	26 Jahre
6	Lämmerbuckeltunnel	DE	1957	2011	54 Jahre
7	Hellbergtunnel	DE	1960	2009	49 Jahre
8	Kanaltunnel Redensburg	DE	1961	2011	50 Jahre
9	Westringtunnel Ulm	DE	1964	2012	48 Jahre
10	Krohnsteigtunnel	DE	1965	1998	33 Jahre
11	Kiesbergtunnel	DE	1970	2014	44 Jahre
12	Tunnel Hölzern	DE	1973	2006	33 Jahre
13	Tunnel Pfaffenstein	DE	1977	2015*	38 Jahre
14	Wilhelminentunnel	DE	1977	2013	36 Jahre
15	Schönbuchttunnel	DE	1978	2014	36 Jahre
16	Johannesgrabentunnel	DE	1979	2014	35 Jahre
17	Schlossbergtunnel Tübingen	DE	1979	2013	34 Jahre
18	Tunnel Hirschhorn	DE	1982	2012	30 Jahre
19	Tunnel Blaubeuren	DE	1983	2012	29 Jahre
20	Trappentreutunnel	DE	1984	2014	30 Jahre
21	Hugenwaldtunnel	DE	1985	2011	26 Jahre
22	Tunnel am Domhof - Köln	DE	1986	2014	28 Jahre
23	Tunnel Rheinuferstraße - Köln	DE	1986	2011	25 Jahre
24	Agnesburgtunnel	DE	1987	2013	26 Jahre
25	Tunnel Schwarzer Berg	DE	1987	2005	18 Jahre
26	Heslacher Tunnel	DE	1991	2011	20 Jahre
27	Tunnel Eching	DE	1995	2015*	20 Jahre
28	Tunnel Etterschlag	DE	1998	2015*	17 Jahre
29	Saukopftunnel	DE	1999	2012	13 Jahre
mittleres Bauwerksalter bei der 1. Instandsetzung					31,8 Jahre

*geplant

⁷⁴⁴ Durchgeführt wurde eine nicht repräsentative Recherche. Aufgenommen wurden lediglich Bauwerke, zu denen Angaben über Instandsetzungsmaßnahmen vorliegen. Art und Umfang der Arbeiten konnte dabei häufig nicht exakt eruiert werden. Für die Berücksichtigung in der Erhebung war wesentlich, dass Instandsetzungsarbeiten an der Betonstruktur vorgenommen wurden.

A.2.1.1.8 Schnittstellen

Planung & Umsetzung:

Die Kosten für die Herstellung der Innenschale werden maßgeblich durch die äußeren Einwirkungen geprägt. Je größer die einwirkenden **Lasten** (Gebirgsdruck, Wasserdruck usw.), desto stärker ist die Innenschale auszubilden, desto höherwertiger ist die Betongüte zu wählen bzw. desto größer sind die Bewehrungsgrade. Die vorherrschenden Gebirgseigenschaften können dabei nur bedingt beeinflusst werden. Dagegen kann mit vorhandenem Gebirgswassern unterschiedlich verfahren werden. Das Bauwerk kann als wasserdichtes Bauwerk (mittels WU-Innenschale oder vollflächiger Abdichtung) ausgebildet werden. Die Innenschale hat dann den entstehenden Wasserdruck eigenständig aufzunehmen und ist entsprechend zu dimensionieren. Bei Anwendung einer Bergwasserdrainage ist kein Wasserdruck auf die Innenschale zu erwarten, dafür ist ein zusätzliches, dauerhaft funktionsfähiges Drainagesystem zu installieren und zu unterhalten. Weitere Einflussgrößen sind u. a. der **Ausbruchsquerschnitt**, die **Tunnellänge**, die **Querschnittsform** sowie die **Baustellenbedingungen**.

Mit dieser Arbeit wird der Fokus auf die Nutzungsphase eines Straßentunnels gerichtet. Für die Bestimmung der Herstellkosten des Rohbaus und die daraus resultierenden Schnittstellen ist deshalb auf bereits entwickelte Ansätze, z. B. von ISAKSSON oder STEIGER⁷⁴⁵, zu verweisen.

Reinigung:

Die Tunnelreinigung wird im Besonderen durch den **Verschmutzungsdruck** beeinflusst. Dieser ist abhängig vom näheren Umfeld (z. B. in der Nähe von Kiesgruben), der **Verkehrsstärke** sowie der **Steigung** und bestimmt wesentlich die Intensität und die Häufigkeit der Reinigung. Der Aufwand ist zudem vom Untergrund sowie der **zu reinigenden Fläche** (Länge und Umfang/Breite) abhängig. Beim Untergrund ist die **Oberflächenbeschaffenheit** entscheidend für die Haftung und die Empfindlichkeit gegenüber Reinigungsmitteln und Reinigungsgeräten. Das Aufbringen einer **Beschichtung** kann dabei zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität führen, wodurch der Reinigungsaufwand und damit die Reinigungskosten sinken.⁷⁴⁶ Durch die verminderte Schmutzhaftung können mitunter auch die Reinigungsintervalle vergrößert werden.

Die Helligkeit und damit die Sichtverhältnisse im Tunnel werden auch durch die Reflexionseigenschaften der Tunnelwände bestimmt. Daraus ergibt sich eine Interdependenz zur **Tunnelbeleuchtung**. Wobei umgekehrt die Beleuchtung grundsätzlich keinen Einfluss auf die Tunnelinnenschale ausübt.

Inspektion:

Die Leistungen für die Inspektion der Tunnelinnenschale werden wesentlich durch den **Zustand** des Bauwerkes (je schlechter der bisherige Zustand, desto größer der Aufwand)⁷⁴⁷ und dem Leistungsumfang (**Bauwerksgröße** und Art der Inspektion) geprägt. Art und Häufigkeit der Inspektion ist durch normative Vorgaben geregelt.

⁷⁴⁵ vgl. ISAKSSON (2002) bzw. STEIGER (2009)

⁷⁴⁶ vgl. ÖBV (2014)_B, S. 2

⁷⁴⁷ vgl. HILLEMEIER ET AL. (2011), S. 323; FSV (2013)_B, S. 5

Wartung & Instandsetzung:

Schnittstellen hinsichtlich der Wartung bzw. Instandsetzung und der dafür verantwortlichen Schädigungsmechanismen (Chlorid-Belastung, Frost usw.) sind nicht bzw. nur schwer zu quantifizieren. Insbesondere durch die Tatsache, dass die Bauwerke grundsätzlich auf eine dauerhafte Gebrauchstauglichkeit hin zu bemessen sind und dadurch mögliche Schadensursachen bereits einbezogen wurden.⁷⁴⁸

Die **Betongüte**, die **Mindestbetondeckung**, die **Oberflächenbeschaffenheit** und die vorherrschenden **Umgebungsbedingungen** (Einwirkungen) werden als Kenngrößen zur Zustandsprognose herangezogen und können dadurch auch als mögliche Einflussgrößen für Umfang und Häufigkeit von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten dienen.⁷⁴⁹ Die durch den Betreiber verfolgte **Instandhaltungsstrategie** (präventiv, zustandsorientiert, korrektiv) ist dabei ein entscheidender Faktor.⁷⁵⁰ Dazu zählt auch eine zusätzliche **Oberflächenvergütung** wodurch ein (zeitlich begrenzter) Schutz des Betontragwerkes erreicht werden kann.

Die sichtbare **Fläche** der Tunnelinnenschale hat Einfluss auf den Umfang von Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten (je größer die Fläche, desto größer die Angriffsfläche und desto mehr Schadstellen sind zu erwarten).

A.2.1.2 Modul Sohle

A.2.1.2.1 Beschreibung

Die Tunnelsohle umfasst den unteren Bereich der Tunnelinnenschale bis ca. in Höhe der Fahrbahn. Wesentliche Bestandteile sind die seitlichen Sohlbalken und der eigentliche Sohlbereich (Sohlgewölbe) (Abbildung A.2.18). Durch den weiteren Aufbau (Füllbeton, Fahrbahn usw.) ist die Sohle nicht mehr direkt zugänglich (Abbildung A.2.19). Aufgaben und Leistungen differieren deshalb zum Modul „Gewölbe“.

A.2.1.2.2 Definition und Abgrenzung des Moduls

Die technisch-funktionale Aufgabe der Tunnelsohle umfasst die dauerhafte Aufnahme und Ableitung der auftretenden Einwirkungen sowohl aus dem Gebirge, dem Gewölbe und der Fahrbahn. Eine gestalterische Funktion ist der Sohle, aufgrund der fehlenden Sichtbarkeit nach Einbau der Fahrbahn, nicht zugeordnet. Zusammen mit den dadurch ersparten Leistungen während der Nutzungsphase (Reinigung, Inspektion usw.) ist die Tunnelsohle getrennt vom Tunnelgewölbe zu betrachten.

Funktionale Unabhängigkeit

Die zur Erfüllung der funktionalen Aufgaben notwendigen Elemente sind für die auftretenden Einwirkungen ausreichend zu dimensionieren. Weitere Elemente sind hierzu nicht notwendig. Die funktionale Unabhängigkeit ist dadurch gewährleistet.

Physische Unabhängigkeit

Trotz der scheinbar dauerhaften Verbindung von Sohle und Gewölbe, kann durch den zeitlich getrennten Einbau zum Tunnelgewölbe sowie der fehlenden Zugänglichkeit für Leistungen während der Nutzungsphase, eine physische Unabhängigkeit

⁷⁴⁸ vgl. GEHLEN, MAYER, GREVE-DIERFELD (2011), S. 233

⁷⁴⁹ vgl. GEHLEN, GREVE-DIERFELD (2013), S. 234

⁷⁵⁰ vgl. Abs. 6.3 – Definition Prozesse

zu weiteren Bestandteilen der Innenschale unterstellt werden. Zwischen dem Fahrbahnaufbau und der Sohle sowie zur Bauwerksentwässerung ist keine dauerhafte Verbindung vorgesehen.

Integrität

Das Modul umfasst alle für die Nutzung erforderlichen Elemente. Durch die Eigenständigkeit ist die Möglichkeit zur Aggregation für einen übergeordneten Untersuchungsrahmen gegeben.

A.2.1.2.3 Elemente

Die wesentlichen Elemente der Tunnelsohle umfassen den Sohlbalken und den dazwischenliegenden Sohlbereich. Hauptbaustoffe sind Stahlbeton, mit einer Betongüte C 25/30 und Bewehrungsstahl (BSt 500 S/M). Zusätzlich sind Fugenbänder in den Arbeits- und Blockfugen vorgesehen. Des Weiteren ist zur Herstellung des erforderlichen Potentialausgleichs im Bereich des Sohlbalkens ein Erdungsband einzubauen (Abbildung A.2.19).

A.2.1.2.4 Prozesse

Neben der Planung und Umsetzung während der Herstellungsphase, beschränken sich die Prozesse für die Tunnelsohle auf die Inspektion, Wartung und Instandsetzung im Zuge der Nutzungsphase. Allerdings sind aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit sowie des vorhandenen Schutzes vor direkten Umwelteinwirkungen (Chloride, Frost, Frost-Tausalz usw.) keine Leistungen während der Nutzungsphase zu erwarten. Insbesondere vor der Tatsache, dass grundsätzlich eine ausreichende Dimensionierung zur Gewährleistung der dauerhaften Gebrauchstauglichkeit erforderlich ist.⁷⁵¹ Die Verwertungsphase bleibt für das zu untersuchende Beispiel außen vor (Tabelle A.2.3).

Tabelle A.2.3: Relevante Prozesse für das Modul „Sohle“

Herstellung		Nutzung							Verwertung
Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Modernisierung	Revitalisierung
X	X	-	-	-	-	-	-	-	-

A.2.1.2.5 Leistungen

Planung:

Die Leistungen beinhalten Planung, Dimensionierung und Dokumentation im Bereich der Objekt- sowie Tragwerksplanung. Zusätzlich umfassen die Planungsleistungen Aufwendungen für die bauherrninterne Verwaltung, die Prüfung der Planung sowie die Bauüberwachung und das Projektmanagement.

Umsetzung:

Die Herstellung der Tunnelsohle umfasst die Einzelschritte Bewehrungseinbau, Schalung, Betonage und Nachbehandlung, inkl. Fugenbandverpressung sowie weitere Nebenleistungen, wie beispielsweise Bauleitung, Koordination und Vermessung.

Während der Nutzungsphase sind keine Leistungen für die Tunnelsohle zu erwarten.

⁷⁵¹ vgl. GEHLEN, MAYER, GREVE-DIERFELD (2011), S. 231 ff.

A.2.1.2.6 Kosten

Wie beim Modul „Gewölbe“, erfolgt die Bestimmung der Kosten durch eigenständige Kalkulation der notwendigen Leistungen für beide Tunnelröhren. Die Eingangsgrößen werden dabei (soweit möglich) aus realen Projekten oder vorliegenden Literaturwerten und Expertenaussagen abgeleitet. Alternativ erfolgt eine realitätsnahe Abschätzung (Abs. A.3.2).

Planung:

Die Bestimmung der Planungskosten (Abs. A.3.2.1) erfolgt analog dem Vorgehen für das Modul „Gewölbe“ (Abs. A.2.1.1.6). Grundlage bildet die HOAI (2013).

Planungs-, Prüf- und Verwaltungskosten: 1.742.000,00 €

Umsetzung:

Die Kosten für die Herstellung der Tunnelsohle werden über eine Kalkulation der erforderlichen Leistungen bestimmt (Abs. A.3.2.2).

Umsetzung Tunnelgewölbe: 11.037.500,00 €

A.2.1.2.7 Zeitliche Parameter

Sowohl die Tatsache, dass während der Nutzungsphase keine Leistungen anfallen als auch, dass der Anfallszeitpunkt der Herstellungskosten und der Bezugszeitpunkt identisch sind, machen eine Erhebung weiterer Zeitlicher Parameter obsolet.

Planung & Umsetzung:

Der Anfallszeitpunkt für die Kosten der Planung und Umsetzung stimmt per Definition mit dem Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung (Ende Herstellungsphase – Beginn Nutzungsphase) überein.

A.2.1.2.8 Schnittstellen

Planung & Umsetzung:

Vergleichbar mit dem Tunnelgewölbe (Abs. A.2.1.1.8) sind die Kosten für die Herstellung der Tunnelsohle durch die äußeren Einwirkungen geprägt. Die Einwirkungen aus dem Tunnelgewölbe bzw. der Tunnelfahrbahn oder verursacht durch den Gebirgswasserdruck (Abdichtung) bedingen eine Abhängigkeit zu den entsprechenden Modulen (**Gewölbe, Fahrbahn, Abdichtung** usw.). Ebenso haben die **Bauwerkslänge** und der **Tunnelquerschnitt** Einfluss auf die zu verbauenden Mengen und damit letztlich auf die Planungs- und Umsetzungskosten.

Dadurch, dass der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Nutzungsphase liegt, werden keine weiteren vertieften Untersuchungen für mögliche Schnittstellen der Tunnelsohle vorgenommen.

A.2.2 Baugruppe Beleuchtung

Zur Vermeidung gefährlicher Situationen müssen dem Verkehrsteilnehmer ausreichend visuelle Informationen über den weiteren Streckenverlauf zur Verfügung stehen. Die Aufgabe der Tunnelbeleuchtung besteht darin, den Verkehrsraum soweit auszuleuchten, dass Hindernisse und Gefahrensituationen im Tunnel frühzeitig zu erkennen sind. Es gilt die Sicherheit der Verkehrsteilnehmer bzw. des Tunnelpersonals zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten. Die hierfür erforderliche Erkennbarkeit von Gegenständen wird wesentlich durch die Beleuchtungstechnik und zusätzlich durch die Reflexionseigenschaften der Tunnelwände sowie der Fahrbahnoberfläche bestimmt.⁷⁵²

Die grundsätzliche technisch-funktionale Aufgabe der Tunnelbeleuchtung umfasst die Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse während der Tunneldurchfahrt. Größte Gefahrenstelle stellt dabei die Einfahrt in den Tunnel dar. Hier muss das menschliche Auge vom taghellen Bereich vor dem Tunnel, an das dunklere Umfeld im Tunnel herangeführt werden (Adaption). Dies führt zu einer Verringerung der Kontraststärke und zu einer Zunahme der Blendungsgefahr und hat zur Folge, dass

- der Adaptionsprozess verlangsamt,
- die Orientierung erschwert und
- die Reaktionszeit vergrößert wird.

Gleichzeit sind Entfernungen und Geschwindigkeiten schlechter abschätzbar.⁷⁵³

Im Tunnel selbst ist lediglich eine reduzierte Ausleuchtung der Fahrstrecke erforderlich. Das Auge hat sich durch seine Adaptionsfähigkeit an die dunklere Umgebung angepasst.⁷⁵⁴

Sowohl in österreichischen (RVS 09.02.41 und ASFINAG PLaPB – Tunnelbeleuchtung) bzw. in deutschen Regelwerken (RABT 2006 bzw. DIN 67524) als auch in internationalen Richtlinien (u. a. CIE 88) wird diesem Umstand Rechnung getragen und der Tunnel in Bereiche unterschiedlicher Leuchtdichte unterteilt. Ausgehend von der Annäherungsstrecke vor der Tunneleinfahrt, gliedert sich das eigentliche Tunnelbauwerk in zwei grundsätzliche Beleuchtungsbereiche: Einfahrtsstrecke und Innenstrecke (Abbildung A.2.21).⁷⁵⁵

Die grundsätzliche Aufgabe der Beleuchtung ist in allen Bereichen identisch. Die einzelnen Beleuchtungsabschnitte erfüllen darüber hinaus zusätzliche Aufgaben, die eine weiterführende Modulunterteilung erforderlich machen. Ferner sind verschiedene Einflussgrößen für die Höhe der Leuchtdichte verantwortlich, so dass eine gemeinsame Betrachtung im weiteren Vorgehen nicht zielführend ist.⁷⁵⁶

Wie in Abbildung A.2.21 bereits angedeutet, ist die Innenbeleuchtung über die gesamte Tunnelstrecke anzuordnen. In der Einfahrtsstrecke ist durch zusätzliche Leuchten, die Differenz zu den erhöhten Leuchtdichtewerten aufzubringen. Nachfolgend werden deshalb die Bereiche Einfahrtsbeleuchtung und Innenbeleuchtung in eigenständige Module aufgeteilt. Zusätzliche Module wären beispielsweise die Pannenbuchtbeleuchtung oder – falls angeordnet – die Ausfahrtsbeleuchtung.

⁷⁵² vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 244 f.; FGSV (2006), S. 13; FSV (2014)A, S. 9

⁷⁵³ vgl. HÖHNE, SCHRÖTER (2002), S. 21 f.

⁷⁵⁴ vgl. SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 244

⁷⁵⁵ vgl. CIE 88 (2004), S. 5; FGSV (2006), S. 51; DIN 67521-1 (2008), S. 9 und FSV (2014)A, S. 4

⁷⁵⁶ Die weiterführenden Aufgaben sowie die unterschiedlichen Einflussgrößen werden in den einzelnen Modulen gesondert untersucht.

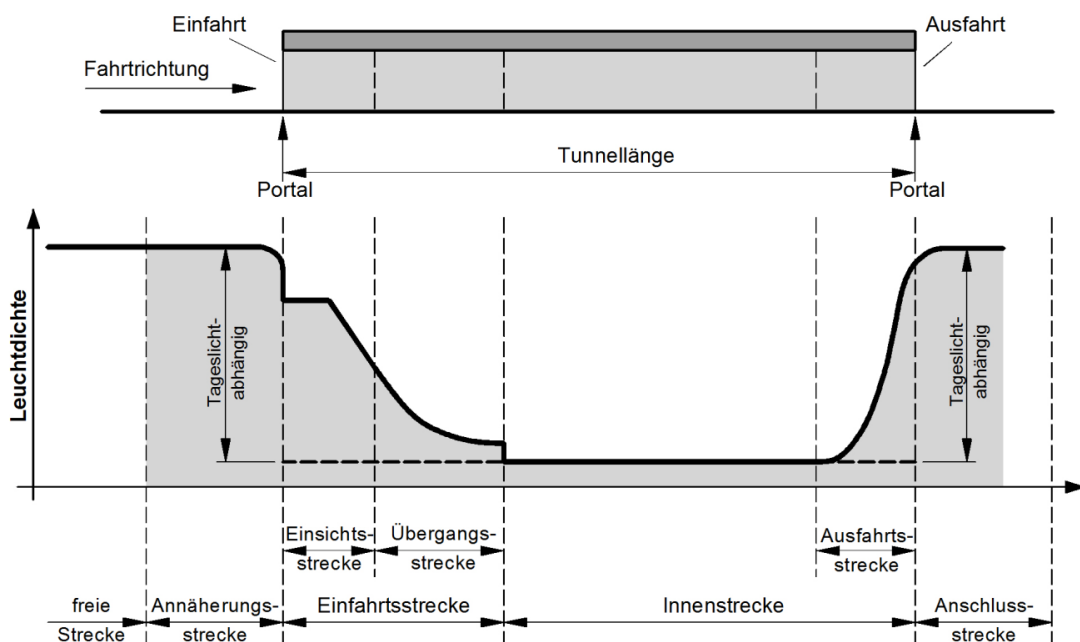


Abbildung A.2.21: Schematischer Verlauf der Leuchtdichte am Tage⁷⁵⁷

A.2.2.1 Modul Einfahrtsbeleuchtung

A.2.2.1.1 Beschreibung

Die Einfahrtsbeleuchtung dient der Anpassung des Sehvermögens vom hellen Außenbereich der Anfahrsstrecke in den deutlich dunkleren Tunnelinnenbereich (Adaption).⁷⁵⁸ Die Strecke der Einfahrtsbeleuchtung setzt sich aus der Einsichts- und Übergangsstrecke zusammen und wird auch als Adaptionstrecke bezeichnet. Sie beginnt ab dem Tunnelportal und schließt damit unmittelbar an die Annäherungsstrecke an. Zur Vermeidung von Kollisionen entspricht die Länge der Einsichtsstrecke der Haltesichtweite. Die erforderliche Leuchtdichte (L_{fe}) verläuft bis zur Mitte der Einsichtsstrecke konstant und ist im weiteren Verlauf kontinuierlich bzw. in Stufen auf 40 % der maximalen Leuchtdichte in der Einsichtsstrecke (L_{fe}) abzusinken. Zur weiteren Adaption wird in der anschließenden Übergangsstrecke das Leuchtdichtenniveau auf mindestens das dreifache Niveau der Innenstrecke reduziert (Abbildung A.2.21).⁷⁵⁹

Ausgehend vom Tunnelportal hat die Einsichtsstrecke eine Länge von 92 bzw. 96 m (abhängig von der Streckenneigung). Die Länge der Übergangsstrecke ergibt sich aus der zul. Höchstgeschwindigkeit sowie dem Verhältnis der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke und der Leuchtdichte der Innenstrecke mit ca. 167 m.

Beim vorliegenden Projekt erfolgt eine Grundaussleuchtung auf dem Niveau der Tunnelinnenstrecke über die gesamte Tunnellänge. Für die Dimensionierung und den Betrieb der Einfahrtsbeleuchtung bedeutet dies, dass eine um die Leuchtdichte der Innenstrecke reduzierte Leuchtdichte in den einzelnen Bereichen tagsüber ausreichend ist. Während der Nachtstunden ist die Einsichtsstrecke mit der Leuchtdichte der Innenstrecke (L_{ii}) zu betreiben, wobei diese durch die Innenbeleuchtung aufgebracht wird.

⁷⁵⁷ in Anlehnung an FGSV (2006), S. 51 und FSV (2014)A, S. 4

⁷⁵⁸ Als Adaption ist die Fähigkeit des menschlichen Auges definiert, die Sensibilität gegenüber einwirkendem Licht eigenständig anzupassen.

vgl. TROTTER (1995), S. 103

⁷⁵⁹ vgl. CIE 88 (2004), S. 5

Die Anpassung der Leuchtdichte an die vorherrschenden Randbedingungen erfolgt durch Stufenschaltung über einen Softwareregler. Als Regelgrößen dienen die Außenleuchtdichte (L_{20}) und die Fahrbahnleuchtdichte der Einsichtsstrecke (L_{fe}), die mit Hilfe von Leuchtdichtemessgeräten kontinuierlich erfasst werden.⁷⁶⁰

Für die Einfahrtsbeleuchtung des Mustertunnels gelten folgende Grundparameter:

- Natriumdampf-Hochdrucklampen als Gegenstrahlbeleuchtung (GSB)
- Leuchtenanordnung erfolgt an der Tunnelfirste (Abbildung A.2.22)
 - Einfahrtsbeleuchtung: zweireihig
 - Innenbeleuchtung: einreihig – versetzt zur Tunnelachse
- Lichtpunkthöhe: 5,75 m
- Stufenschaltung mit 8 Helligkeitsstufen
(100 %, 87,5 %, 75 %, 62,5 %, 50 %, 37,5 %, 25 %, 12,5 %)
- Leuchtdichte Annäherungsstrecke Westportal (Südröhre) $L_{20,W} = 3.480,0 \text{ cd/m}^2$
- Leuchtdichte Annäherungsstrecke Ostportal (Nordröhre) $L_{20,O} = 3.570,0 \text{ cd/m}^2$
- Betriebswerte Leuchtdichte

Einsichtsstrecke – Westportal (Südröhre)	$L_{BE,fe,W} = 174,0 \text{ cd/m}^2$
Einsichtsstrecke – Ostportal (Nordröhre)	$L_{BE,fe,O} = 178,5 \text{ cd/m}^2$
Innenstrecke – Tag (Nord- und Südröhre)	$L_{BE,fi} = 3,3 \text{ cd/m}^2$
- Planungsfaktor $L_{PL} = 0,70$
- Fahrbahnoberfläche: Betonfahrbahn – Belagsklasse R2, $q_0 = 0,08 \text{ cd/m}^2\text{lx}$
- Tunnelwand: Sichtbeton, $q_0 = 0,20 \text{ cd/m}^2\text{lx}$ (Reflexionsgrad 0,5)
- Betriebsart: Richtungsverkehr
- zul. Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h
- Gefährdungsklasse II

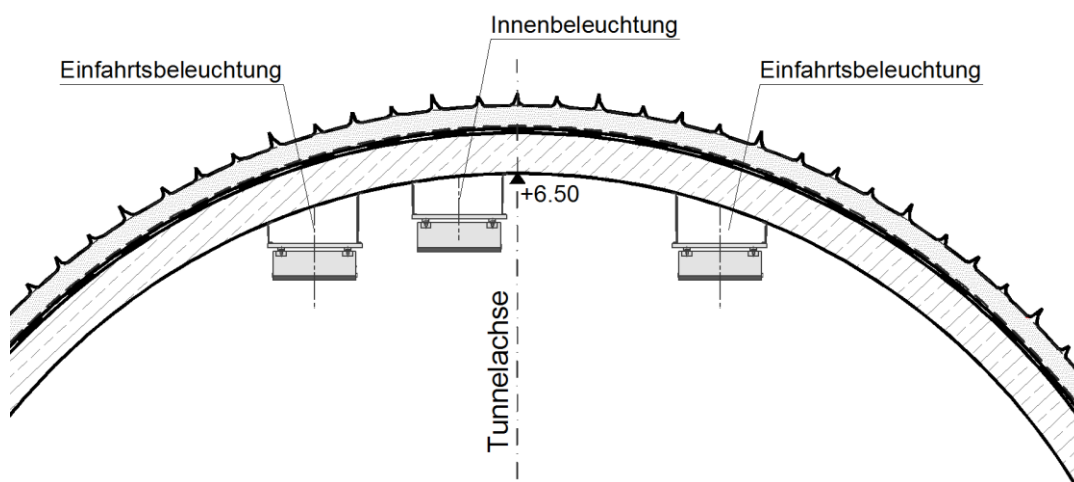


Abbildung A.2.22: Anordnung Beleuchtung im Tunnelquerschnitt

⁷⁶⁰ vgl. ASFINAG (2012)A, S. 19 bzw. S. 23

A.2.2.1.2 Definition und Abgrenzung des Moduls

Die technisch-funktionale Aufgabe der Einfahrtsbeleuchtung umfasst, neben der Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse, die Unterstützung des menschlichen Auges bei der Adaption vom helleren Tunnelvorfeld, an die dunklere Umgebung im Tunnelinneren. Zusätzliche Abgrenzungsmerkmale der Einfahrtsbeleuchtung zu anderen Beleuchtungskomponenten sind die maßgeblichen Einflussgrößen, wie beispielsweise die zul. Höchstgeschwindigkeit oder die Leuchtdichte in der Annäherungsnäherungsstrecke.

Funktionale Unabhängigkeit

Der autarke Betrieb durch eine eigenständige Steuerung sowie der von anderen Bereichen unabhängige Leuchtdichtebedarf gewährleisten die funktionale Unabhängigkeit des Moduls. Dabei ist die technisch-funktionale Aufgabe deutlich zu artgleichen Modulen abgegrenzt.⁷⁶¹ Hinzu kommt, dass die zentralen Elemente der Steuerung (Leuchtdichtemessgerät usw.) im Modul integriert sind. Einzig die Stromversorgung und die übergeordnete, softwaregestützte Steuerung erfolgen extern.

Physische Unabhängigkeit

Die Leuchten für die Einfahrtsbeleuchtung sind mit einer eigenständigen Leuchtenunterkonstruktion an der Tunneldecke, in Ausnahmefällen auch an der Tunnelwand, zu befestigen.⁷⁶² Dies hat durch reversible Verschraubung zu erfolgen, so dass ein notwendiger Austausch jederzeit erfolgen kann. Die erforderliche Verkabelung ist in zugänglichen Kabel- oder Versorgungskanälen bzw. vorab verlegten Kabelschutzrohren zu führen.⁷⁶³ Eine gegenständliche Trennung, auch nur einzelner Elemente der Einfahrtsbeleuchtung, ist dadurch gewährleistet. Das Kriterium der physischen Unabhängigkeit gilt als erfüllt.

Integrität

Abgesehen von der Stromversorgung und der übergeordneten, softwaregestützten Steuerung, umfasst das Modul alle für den Betrieb erforderlichen Elemente. Eine Aggregation zu einem übergeordneten Untersuchungsrahmen ist durch die Eigenständigkeit gegeben.

A.2.2.1.3 Elemente

Die Einfahrtsbeleuchtung ist mit Natriumdampf-Hochdrucklampen (HST) ausgerüstet. Die Messung und Steuerung der Leuchtdichte erfolgt über Leuchtdichtemesssensoren.

Das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“ umfasst im Wesentlichen die Elemente:

- 2 x 62 Spezialtunnelleuchte 150 W (HST), einflammig, asymmetrisch (GSB)
- 2 x 24 Spezialtunnelleuchte 250 W (HST), einflammig, asymmetrisch (GSB)
- 2 x 80 Spezialtunnelleuchte 400 W (HST), einflammig, asymmetrisch (GSB)
- ca. 2 x 9.000 lfm Verkabelung (Kabel N2XH-J)
- ca. 2 x 500 lfm Kabelrinne
- 2 x 1 Sensor Außenleuchtdichte L_{20}
- 2 x 2 Sensoren Leuchtdichte Einsichtsstrecke

⁷⁶¹ siehe Abs. A.2.2.1.1

⁷⁶² vgl. ASFINAG (2012)A, S. 41 bzw. S. 50 f.

⁷⁶³ vgl. ASFINAG (2012)A, S. 53 f.

A.2.2.1.4 Prozesse

Die Herstellungsphase umfasst die Prozesse der Planung und Umsetzung. Der Fokus für die Beleuchtung richtet sich aber verstärkt auf die Gewährleistung eines dauerhaften Betriebes während der Nutzungsphase. Wesentlicher Prozess hierbei ist die Energieversorgung der Beleuchtung und der Steuerungskomponenten.

Zur Aufrechterhaltung der erforderlichen Leuchtdichte sind die Leuchten, inkl. der Verglasung, regelmäßig zu reinigen. Durch wiederkehrende Inspektionen ist die dauerhafte Funktionsfähigkeit sicherzustellen. Gleiches wird mit der Durchführung von Wartungsarbeiten angestrebt. Dazu zählt auch ein prophylaktischer Austausch von Leuchtmitteln nach vordefinierten Betriebsintervallen oder der azyklische Leuchtmitteltausch bei Ausfall zahlreicher Leuchtmittel. Ebenso ist eine regelmäßige Kalibrierung der Leuchtdichtemessgeräte vorzunehmen.

Die Instandsetzung umfasst Maßnahmen zur Behebung von Schäden oder fehlender Funktionsfähigkeit an der gesamten Beleuchtungsanlage. Umfang und Häufigkeit sind dabei wesentlich von der vorgesehenen Instandhaltungsstrategie geprägt.

Gegenüber der Baukonstruktion hat die Beleuchtung eine deutlich reduzierte Lebensdauer von rund 20 Jahren.⁷⁶⁴ Dadurch ist eine stetige Erneuerung der Beleuchtungsanlage über den Bauwerkslebenszyklus notwendig. Diese umfasst einen Ausbau des Moduls bzw. großer Teile davon sowie den Einbau neuer, gleichwertiger Komponenten. Erfolgt ein Austausch mit technisch weiterentwickelten Komponenten, so ist hierunter eine Modernisierung zu verstehen. Aufgrund der kaum vorhersehbaren technischen Entwicklung, bleibt die Modernisierung an dieser Stelle allerdings unberücksichtigt.

Die Verwertungsphase im Lebenszyklus wird nicht betrachtet, so dass die zugehörigen Prozesse in diesem Beispiel nicht einbezogen werden (Tabelle A.2.4).

Tabelle A.2.4: Relevante Prozesse für das Modul „Einfahrtsbeleuchtung“

Herstellung		Nutzung							Verwertung
Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Modernisierung	Revitalisierung
X	X	X	X	X	X	X	X	(X)	-

A.2.2.1.5 Leistungen

Planung:

Die Planung umfasst die Dimensionierung der Beleuchtungsanlage, die Erstellung der notwendigen Planungsunterlagen sowie die Dokumentation. Zusätzlich sind die Aufwendungen für die bauherrninterne Verwaltung, die Prüfung der Planung sowie die Bauüberwachung und das Projektmanagement einzubeziehen.

Umsetzung:

Die Umsetzung erfasst die Lieferung, den Einbau sowie die Kalibrierung und Prüfung der gesamten Beleuchtungsanlage im Einfahrtsbereich.

Versorgung:

Zur Erzeugung der notwendigen Leuchtdichte ist die Einfahrtsbeleuchtung während der Tagesstunden mit ausreichend Energie zu versorgen. Während der Nachtstunden wird

⁷⁶⁴ vgl. FSV (2014)c, S. 10

die erforderliche Leuchtdichte durch die Innenbeleuchtung aufgebracht, so dass keine Stromversorgung erfolgt (ausgenommen Notfallsituationen).

Reinigung:

Die Tunnelleuchten werden mit Hilfe von Waschbürsten bzw. Hochdruck-Wassersprühbalken im Zuge der Reinigung der Tunnelwände äußerlich gereinigt.

Die Innenreinigung der Leuchten (Innenseite Abdeckglas, Spiegel usw.) wird den Wartungsarbeiten zugeordnet, da diese Leistung im Zuge des periodischen Leuchtmittel-tausches vorgenommen wird.

Inspektion:

Die Inspektion umfasst die jährliche Kontrolle sowie die zyklische Prüfung der einzelnen Komponenten. Die Inspektionszyklen und die dabei zu untersuchenden Bauelemente sind durch Anhang 2 der Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegeben.⁷⁶⁵

Wartung:

Aus wirtschaftlichen Gründen werden vor Ablauf der zu erwartenden Lebensdauer, die gesamten Leuchtmittel der Einfahrtsbeleuchtung ausgetauscht. Zur Erhaltung der Lichtausbeute erfolgt zeitgleich mit dem Leuchtmittel-tausch eine Innenreinigung der Leuchten (Spiegel, Abdeckglas). Aufgrund der Planmäßigkeit der Leistungen sind diese der Wartung zu zuschreiben.

In größeren Wartungszyklen ist des Weiteren ein vollständiger Tausch aller Vorschaltgeräte vorzunehmen. Die Lebensdauer der Vorschaltgeräte beträgt ca. 100.000 h. Bei einer angenommenen durchschnittlichen Betriebsdauer von 4.380 h pro Jahr (Tagstunden) wäre ein Austausch in einem Zyklus von ca. 22 Jahren erforderlich. Da die Lebensdauer der gesamten Leuchte lediglich ca. 20 Jahre beträgt, erfolgt bereits vor dem eigentlichen Ende der Lebensdauer des Vorschaltgerätes ein Austausch im Zuge der Erneuerung der Beleuchtungsanlage.

In regelmäßigen Abständen ist die Beleuchtungsanlage zu kalibrieren. Dazu sind Abweichungen im tatsächlichen Leuchtdichteverlauf durch Vor-Ort-Messungen aufzunehmen und durch Kalibrierung der Steuerungseinheiten zu beheben.

Instandsetzung:

Die Instandsetzung beinhaltet alle außerplanmäßigen Leistungen zur Wiederherstellung der Leistungsfähigkeit der Tunnelbeleuchtung. Dies schließt den Austausch defekter Leuchten, Leuchtmittel bzw. Sensoren sowie Reparaturarbeiten an der Beleuchtungsanlage ein.

Der frühzeitige Ausfall von Leuchtmitteln wird mit 3 % jährlich abgeschätzt.

Für die Leuchten wird eine auf die Betriebsdauer bezogene Steigerung der Ausfallrate von 0,5 % (nach der Neuinstallation) bis zu 3 % (vor der geplanten Erneuerung) angesetzt.⁷⁶⁶ Zusätzlich werden jährliche Reparaturarbeiten – ebenfalls als steigende Funktion – als pauschale Stundenaufwendungen berücksichtigt (Abbildung A.2.23).

⁷⁶⁵ vgl. FSV (2014)c, Anhang 2

⁷⁶⁶ Der Anstieg wird in Anlehnung an die Aufwendungen für die Wartungsarbeiten am Tunnelgewölbe mit einer Funktion achten Grades abgeschätzt.
vgl. Abs. A.2.1.1.5 – Wartungsarbeiten

Die dreijährige Gewährleistungsfrist nach ÖNORM B 2110 führt dazu, dass die vor diesem Zeitraum anfallenden Leistungen durch den Ersteller zu erbringen. Für den Betreiber fallen in diesem Zeitraum somit keine Aufwendungen an (Abbildung A.2.23).⁷⁶⁷

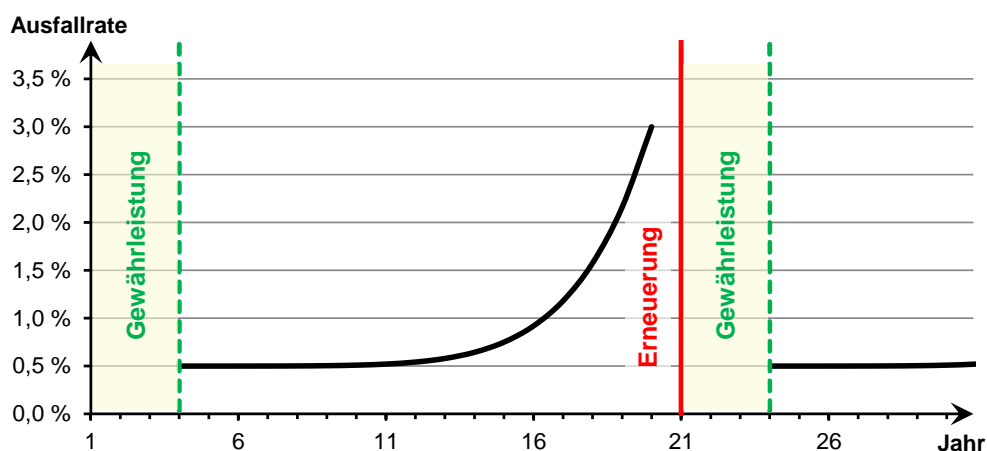


Abbildung A.2.23: Ausfallrate Leuchten

Erneuerung:

Der begrenzten Lebensdauer der Beleuchtungsanlage ist geschuldet, dass über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes eine mehrmalige Erneuerung erfolgen muss. Dazu sind im Vorfeld Planungsleistungen zu erbringen. Zusätzlich sind die verbauten Elemente zurückzubauen und zu entsorgen. Anschließend sind neue, technisch gleichwertige Bauteile einzubauen und die notwendigen Messungen und Einstellungen vorzunehmen. Für die Erneuerung werden Leuchten und Sensorik, aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauern (Leuchten ca. 20 Jahre, Sensorik ca. 15 Jahre), differenziert betrachtet.

A.2.2.1.6 Kosten

Die Kalkulation der Kosten für die einzelnen Teilleistungen basiert auf realen Größen, in der Literatur veröffentlichten Werten, normativen Vorgaben bzw. eigenständigen Abschätzungen. Zur Kostenermittlung werden beide Tunnelröhren einbezogen (Abs. A.3.3).

Planung:

Die Bestimmung der Planungskosten erfolgt in Anlehnung an die deutsche Honorarordnung (HOAI) – Fachgebiete Objektplanung Ingenieurbauwerke (§ 44) und Technische Ausrüstung (§ 56).⁷⁶⁸ Die Verwaltungskosten werden über Personalkosten abgeschätzt (Abs. A.3.3.1).⁷⁶⁹

Planung und Verwaltung:	162.000,00 €
-------------------------	--------------

⁷⁶⁷ vgl. ÖNORM B 2110 (2013) – Abschnitt 5.45

⁷⁶⁸ vgl. HOAI (2013), § 44 bzw. § 56

Für die anrechenbaren Kosten zur Bestimmung der Planungskosten wird auf die Umsetzungskosten zurückgegriffen. Dabei wird ein pauschaler Abschlag einbezogen, um berücksichtigen zu können, dass es sich hier nur um Teilleistungen für die Gesamtplanung handelt.

⁷⁶⁹ In den Verwaltungskosten ist ein Zuschlag für die Gemeinkosten in Höhe von 20 % berücksichtigt. vgl. BMV (2001), S. 45; BMVBS (2013)B, S. 65

Umsetzung:

Die Kosten für den Einbau der Einfahrtsbeleuchtung werden eigenständig kalkuliert. Dazu wurden aus verschiedenen Ausschreibungsunterlagen Einheitspreise erhoben, auf den Bezugszeitpunkt 2014 umgerechnet und Mittelwerte gebildet (Abs. A.3.3.2).

Umsetzung:	320.100,00 €
------------	--------------

Versorgung:

Die Kosten für den Prozess Versorgung beziehen ausschließlich die Kosten für die Energieversorgung ein. Dazu sind die tatsächlichen jährlichen Betriebsstunden der einzelnen Leuchten, deren jeweilige Leistungsaufnahme und der aktuelle Energiepreis zu den Kosten für Energie zusammenzuführen.

Bislang liegt keine verwertbare Erfassung für die jährlichen Betriebsstunden der Einfahrtsbeleuchtung vor. Zur Bestimmung der Brenndauern wird, unter Rückgriff auf die Aufstellung von HOPFERWIESER und der Auswertung eines realen Bauwerkes von MARNY, eine Abschätzung für die einzelnen Stufen vorgenommen.⁷⁷⁰

Die Leistungsaufnahme einer einzelnen Leuchte setzt sich aus dem Energiebedarf der Leuchtmittel und dem dazugehörigen Vorschaltgerät zusammen. Die Leuchten sind dabei mit Verlustarmen Vorschaltgeräten (VVG) ausgestattet.⁷⁷¹ Zusätzlich wird der Stromverbrauch der Leuchtdichtemessgeräte einbezogen.

Als Energiepreis zahlen Großkunden in Österreich derzeit im Schnitt 13 €Cent/kWh inkl. Steuern und Abgaben. Darin enthalten ist ein Mehrwertsteueranteil von ca. 2 €Cent/kWh, so dass ein um Steuern bereinigter Energiepreis von 11 €Cent/kWh berücksichtigt wird (Abs. A.3.3.3).⁷⁷²

Energieversorgung:	27.600,00 €
--------------------	-------------

Reinigung:

Die Kosten für die Reinigung der Leuchten werden über den Aufwand und die daraus resultierenden Personal- und Gerätekosten abgeschätzt (Abs. A.3.3.4). Die Reinigung der Sensorik erfolgt zusammen mit der Inspektion bzw. Wartung. Auf einen gesonderten Ansatz als zusätzliche Reinigungskosten wird verzichtet.

Reinigung:	500,00 €
------------	----------

Inspektion:

Die Kosten für die Inspektion werden durch Abschätzung des Leistungsaufwandes für die einzelnen Teilleistungen bestimmt. Dabei wird zwischen den Kosten für die jährlich stattfindenden Inspektionen (Kontrolle) (Abs. A.3.3.5) und den zusätzlichen Kosten für die Prüfungen unterschieden (Abs. A.3.3.6).

Inspektion – Kontrolle:	1.500,00 €
-------------------------	------------

Inspektion – Prüfung:	1.700,00 €
-----------------------	------------

⁷⁷⁰ siehe HOPFERWIESER (1977), S. 81 bzw. MARNY (2012), S. 104 ff.

⁷⁷¹ Der Leistungsbedarf von Leuchtmitteln und Vorschaltgeräten ist den technischen Datenblättern der Leuchtenhersteller zu entnehmen. Siehe beispielsweise Ergebnisplots der Parameterstudie zur Schnittstellenbestimmung der Einfahrtsbeleuchtung.

⁷⁷² vgl. <http://oesterreichsenergie.at/daten-fakten/statistik/Strompreis.html> (abgerufen am 23.10.2014); http://www.statistik.at/web_de/statistiken/preise/energiepreise/074081.html (abgerufen am 23.10.2014)

Wartung:

Die Kosten für die Wartung werden entsprechend dem zeitlichen Anfall der Leistungen getrennt für die Kalibrierung der Leuchtdichte sowie für den Leuchtmitteltausch berücksichtigt. Die Abschätzung erfolgt über die zeitlichen Aufwendungen sowie über die Kosten für Material und Geräte (Abs. A.3.3.7 und Abs. A.3.3.8).

Wartung – Kalibrierung Leuchtdichte:	1.100,00 €
Wartung – Leuchtmitteltausch:	19.800,00 €

Instandsetzung:

Für die Instandsetzungsarbeiten werden der Ausfall von Leuchtmitteln und Leuchten sowie sonstige Reparaturarbeiten berücksichtigt. Die daraus resultierenden Kosten werden über den Personalaufwand, die Geräte- sowie Materialkosten für die Austauschelemente bestimmt. Dabei wird für die Ausfallrate der Leuchten und die sonstigen Reparaturaufwendungen eine jährliche Steigerung bis zur Modulerneuerung angesetzt (Abs. A.3.3.9 und Abs. A.3.3.10).

Instandsetzung – Leuchten und Leuchtmittel:	1.900,00 €
Instandsetzung – sonstige Reparaturarbeiten:	1.200,00 €

Erneuerung:

Nach Erreichen der (geplanten) Nutzungsdauer erfolgt planmäßig ein vollständiger Austausch der Beleuchtungsanlage.⁷⁷³ Die Leistungen der Erneuerung erfassen den Rückbau der bestehenden sowie die Planung und den Einbau der neuen Anlage. Zusätzlich werden die Verwaltungskosten über einen Stundenaufwand abgeschätzt. Aufgrund der unterschiedlichen Nutzungsdauern für Sensorik bzw. Leuchten wird eine getrennte Erfassung der Kosten vorgenommen (Abs. A.3.3.11 und Abs. A.3.3.12).

Erneuerung – Sensorik:	32.700,00 €
Erneuerung – Leuchten:	416.000,00 €

A.2.2.1.7 Zeitliche Parameter

Planung & Umsetzung:

Der Anfallszeitpunkt für die Kosten der Planung und Umsetzung wird per Definition auf den Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung (Ende Herstellungsphase – Beginn Nutzungsphase) gelegt.

Versorgung:

Die Kosten für die Energieversorgung der Beleuchtung sind als jährliche Kosten zu berücksichtigen.

Versorgung:	1x jährlich
-------------	-------------

Reinigung:

Die Reinigung der Leuchten erfolgt einmal pro Jahr. Um Synergieeffekte nutzen zu können, hat dies zeitgleich mit anderen Reinigungsarbeiten im Tunnel zu erfolgen.

Reinigung:	1x jährlich
------------	-------------

⁷⁷³ Die durchschnittliche Lebensdauer aus FSV (2014)c, Anhang 1 wird an dieser Stelle der geplanten Nutzungsdauer gleichgesetzt.

Inspektion:

Die Häufigkeit der unterschiedlichen Inspektionsmaßnahmen (Kontrolle oder Prüfung) ist durch die Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegeben.⁷⁷⁴

Inspektion – Kontrolle:	1 x jährlich
Inspektion – Prüfung:	alle 3 Jahre

Wartung:

Aktuelle Natriumdampf-Hochdrucklampen haben eine Lebensdauer von rund 30.000 Stunden.⁷⁷⁵ Leuchtmittel unterliegen einem physikalischen Alterungsprozess, was zu einer zeitlich bedingten Abnahme des relativen Lichtstroms führt. Zur Erzielung der erforderlichen Leuchtdichte ist deshalb vor Erreichen der eigentlichen maximalen Lebensdauer ein Leuchtmitteltausch vorzunehmen. Die Vielzahl an Schaltvorgängen, zur zeitnahen Anpassung der Einfahrtsbeleuchtung an die erforderliche Leuchtdichte, reduziert die Lebensdauer zusätzlich.⁷⁷⁶ Um eine Häufung der Leuchtmittelausfälle zu vermeiden und dadurch die Verkehrssicherheit zu gefährden, werden prophylaktisch die Leuchtmittel der gesamten Einfahrtsbeleuchtung in einem Zyklus von vier Jahren getauscht.⁷⁷⁷

Die unter Wartung zusammengefassten Leistungen zur Kalibrierung der Leuchtdichte haben jährlich zu erfolgen.

Wartung – Kalibrierung:	1 x jährlich
Wartung – Leuchtmitteltausch:	alle 4 Jahre

Instandsetzung:

Die Reparaturarbeiten an der Beleuchtungsanlage sowie der Austausch von defekten Leuchten bzw. Leuchtmitteln werden als jährlich anfallende Aufwendungen zusammengefasst.

Instandsetzung – Leuchten & Leuchtmittel:	1 x jährlich
Instandsetzung – Reparaturarbeiten:	1 x jährlich

Erneuerung:

Ausgehend von den in der Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegebenen, durchschnittlichen Lebensdauern, erfolgt eine Erneuerung der Leuchten in einem Zyklus von 20 Jahren. Die Sensorik wird alle 15 Jahre erneuert.⁷⁷⁸

Erneuerung – Sensorik:	alle 15 Jahre
Erneuerung – Leuchten:	alle 20 Jahre

⁷⁷⁴ vgl. FSV (2014)c, Anhang 2

⁷⁷⁵ vgl. WALT (2008), S. 67

⁷⁷⁶ vgl. HÖHNE (2002), S. 136 und S. 191

⁷⁷⁷ vgl. FGSV (2011), S. 33 oder auch HÖHNE (2002), S. 137

⁷⁷⁸ vgl. FSV (2014)c, S. 10

Die durchschnittliche Lebensdauer wird an dieser Stelle der geplanten Nutzungsdauer gleichgesetzt.

A.2.2.1.8 Parameterstudie zur Eingrenzung der Schnittstellen

Die Einflussgrößen und Schnittstellen für die einzelnen Prozesse bzw. Leistungen, den zugehörigen Kosten und den Zeitlichen Parametern werden aus den technischen Vorschriften und Richtlinien (RVS 09.02.22, PLaPB – Tunnel-Beleuchtung, CIE 88, CIE 189, DIN 67524-1, RABT 2006) allgemeingültig abgeleitet.⁷⁷⁹ Im weiteren Schritt wird mit Hilfe der vorliegenden Parameter und der aktuellen Ausgestaltung eine Eingrenzung der veränderlichen Eingangsgrößen vorgenommen.

Die Strecke der Einfahrtsbeleuchtung setzt sich aus der Einsichtsstrecke und der Übergangsstrecke zusammen (Abbildung A.2.21). Aufgrund unterschiedlicher Einflussgrößen sind diese beiden Bereiche im ersten Schritt getrennt zu untersuchen.

Einsichtsstrecke

Die erforderliche Leuchtdichte in der Einsichtsstrecke leitet sich aus der Leuchtdichte der Annäherungsstrecke (L_{20})⁷⁸⁰ ab und wird durch die Fahrgeschwindigkeit und die Beleuchtungsart (symmetrisch bzw. Gegenstrahlbeleuchtung) über den Faktor k beeinflusst.⁷⁸¹

$$L_{fe} = k \cdot L_{20} \quad (\text{A.2.34})$$

Die Außenleuchtdichte L_{20} wird durch folgende Faktoren beeinflusst:⁷⁸²

- Himmelsanteil
- Fahrbahn im Bereich der Annäherungsstrecke
- Umgebung (Portal, Böschungen, Wände usw.)
- Himmelsrichtung/Fahrtrichtung
- Verkehrsart
- Fahrgeschwindigkeit

Der Faktor k ist abhängig von⁷⁸³

- der Beleuchtungsart (Gegenstrahlbeleuchtung / symmetrische Beleuchtung) sowie
- der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Tunnel.

Bedingt durch schwankende Lichtverhältnisse ist die Leuchtdichte in der Annäherungsstrecke im Tagesverlauf nicht konstant. Aus diesem Grund ist die Leuchtdichte in der Einfahrtsstrecke den sich ändernden Randbedingungen fortlaufend anzupassen. Dies hat kontinuierlich (über Dimmung) bzw. alternativ über Stufenschaltung zu erfolgen. Den vorgegebenen Leuchtdichteverlauf gilt es dabei nicht bzw. nur in begrenztem Maße zu unterschreiten.⁷⁸⁴ Die Länge der Einsichtsstrecke ist davon nicht betroffen. Sie richtet sich im Wesentlichen nach dem Anhalteweg bzw. der Haltesichtweite.

⁷⁷⁹ vgl. FSV (2014)A; ASFINAG (2012)A; CIE 88 (2004); CIE 189 (2010); DIN 67524-1 (2008); FGSV (2006)

⁷⁸⁰ Die Leuchtdichte L_{20} beschreibt die Helligkeit der Tunnelumgebung im 20° Sichtfeld des heranfahrenden Fahrzeugführers.

vgl. EBERBACH, (2003), S. 35; FGSV (2006), S. 52

⁷⁸¹ vgl. FGSV (2006), S. 16 und FSV (2014)A, S. 16

⁷⁸² vgl. FSV (2014)A, S. 16

⁷⁸³ vgl. FSV (2014)A, S. 16

⁷⁸⁴ vgl. FGSV (2006), S. 17; FSV (2014)A, S. 17

Exkurs Haltesichtweite

Die Haltesichtweite bezeichnet die Strecke, die benötigt wird, um ein Fahrzeug vor einem unerwartet auftretenden Hindernis zum Stehen zu bringen (= Anhalteweg). Sie setzt sich aus dem zurückgelegten Weg während der Reaktionszeit (x_0) und dem reinen Bremsweg (x) zusammen (Abbildung A.2.24).

RVS 09.02.41 gibt hierzu folgende Berechnungsgleichungen vor:⁷⁸⁵

$$s_H = x_0 + x \tag{A.2.35}$$

mit:

s_H	[m]	Haltesichtweite (Anhalteweg)
x_0	[m]	Reaktionsweg
x	[m]	Bremsweg

Der Reaktionsweg (x_0) ergibt sich aus:

$$x_0 = \frac{v}{3,6} \cdot t_0 \tag{A.2.36}$$

mit:

v	[km/h]	Geschwindigkeit
t_0	[s]	Reaktionszeit ⁷⁸⁶

Der Bremsweg (x) wird bestimmt mit:

$$x = \frac{\left(\frac{v}{3,6}\right)^2}{2 \cdot g \cdot \left(f_B \pm \frac{s}{100\%}\right)} \tag{A.2.37}$$

mit:

g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2 = \text{konst.}$)
a	[m/s ²]	mittlerer Bremsverzögerungsfaktor ⁷⁸⁷
s	[%]	Längsneigung mit Gefälle (-) bzw. Steigung (+)

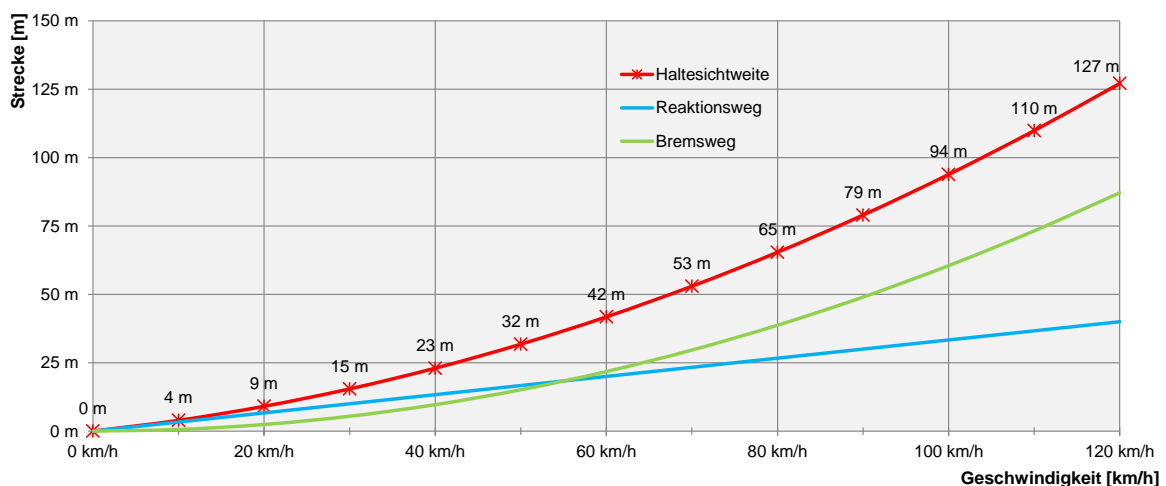


Abbildung A.2.24: Haltesichtweite in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit bei einer Längsneigung von 0 %

⁷⁸⁵ vgl. FSV (2014)A, S. 10

⁷⁸⁶ Für die Reaktionszeit t_0 ist eine Dauer von 1,2 s vorgegeben. [vgl. FSV (2014)A, S. 10]

⁷⁸⁷ Die Bremsverzögerung f_B ist mit 0,65 [-] zu berücksichtigen. [vgl. FSV (2014)A, S. 10]

Übergangsstrecke

Zur weiteren Unterstützung der Adaption ist im Anschluss an die Einsichtsstrecke das Leuchtdichtenniveau auf mindestens das dreifache Niveau der Innenstrecke abzusenken. Die Länge der Übergangsstrecke ergibt sich dabei aus dem Leuchtdichtenniveau am Ende der Einfahrtsstrecke und dem Niveau für die Tunnelinnenstrecke. Zusätzlich wird die Streckenlänge durch die Trägheit der Adaption über die Durchfahrtsgeschwindigkeit (Fahrzeit) beeinflusst. Der Verlauf der Fahrbahnleuchtdichte in der Übergangsstrecke ($L_{f\ddot{u}}$) ist über folgende mathematische Zusammenhänge zu bestimmen:⁷⁸⁸

$$L_{f\ddot{u}} = L_{fe} \cdot (1,9 + t)^{-1,4} \quad (\text{A.2.38})$$

mit:

L_{fe} [cd/m²] Leuchtdichte zu Beginn der Einsichtsstrecke (= 100 %)
 t [s] Fahrzeit, mit $t = 0$ zu Beginn der Übergangsstrecke

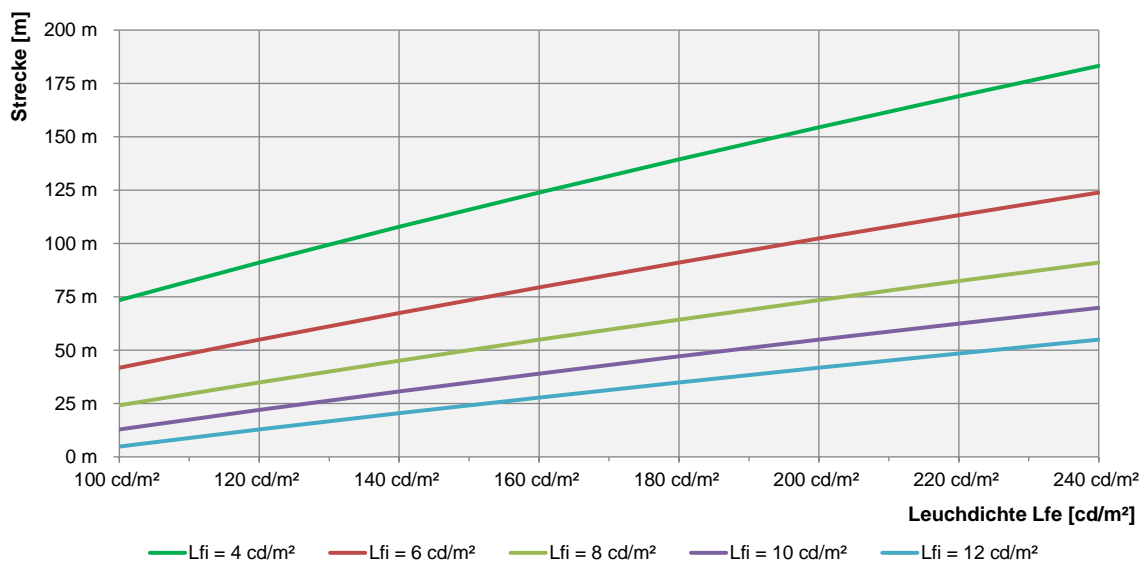


Abbildung A.2.25: Länge der Übergangsstrecke bei $v = 100$ km/h in Abhängig von der Leuchtdichte der Einfahrtsstrecke

Am Ende der Übergangsstrecke darf die Fahrbahnleuchtdichte ($L_{f\ddot{u}} + L_{fi}$) die Leuchtdichte der Innenstrecke (L_{fi}) um den Faktor drei nicht überschreiten. Aus dieser Forderung heraus lässt sich die Länge der Übergangsstrecke über die Fahrgeschwindigkeit bestimmen.

Die wesentlichen Faktoren für die Übergangsbeleuchtung umfassen:

- Leuchtdichte in der Einsichtsstrecke
- Leuchtdichte in der Innenstrecke
- Fahrgeschwindigkeit

⁷⁸⁸ vgl. FSV (2014)A, S. 17

Die jeweils erforderliche Leuchtdichte, also der Helligkeitseindruck den das menschliche Auge von einer selbst leuchtenden bzw. einer direkt oder indirekt beleuchteten Fläche hat, ist neben der Leuchtstärke, vom Reflexionsgrad der umgebenden Fläche abhängig.⁷⁸⁹ Insbesondere die Reflexionseigenschaften der Fahrbahn und der Tunnelwände als Kontrastflächen haben großen Einfluss auf die erforderliche Leuchtdichte. Deren Reflexionsvermögen wird wesentlich geprägt durch:⁷⁹⁰

- Oberflächenbeschaffenheit
- Zusammensetzung
- Abnutzungsgrad
- Oberflächenzustand (trocken, feucht, nass)
- Verschmutzungsgrad

Weitere Kriterien für die Dimensionierung der Beleuchtung in der Einfahrtsstrecke umfassen die Bauart der verwendeten Lampen und deren Anordnung im Tunnelquerschnitt (Abbildung A.2.26). Hinzu kommen geometrische Randbedingungen, wie die Querschnittsform oder die Querschnittsabmessungen, die Dimensionierung und den Betrieb der Einfahrtsbeleuchtung beeinflussen.

Zusätzlich werden die Aufwendungen für Reinigung, Prüfung, Wartung und Instandsetzung ganz wesentlich durch Art und Anzahl der Leuchten sowie deren Zugänglichkeit bestimmt.

Die Lebensdauer bzw. geplante Nutzungsdauer beeinflusst die Häufigkeit der Instandsetzungs- bzw. Austausch- oder Erneuerungsarbeiten.

		1	2	3	4	5
1	Rechteckquerschnitt					
2	Beleuchtungs-technik	Breite b bis	2 h	4 h	3 - 4 h	
3	Bel. Art	SB + GSB				SB (GSB)
4	Montage	nur in Ausnahmefällen ($h < 4,80$ m) in Betondecke einlassen				Lichtraumprofil beachten
5	Gewölbequerschnitte					
6	Beleuchtungs-technik	Breite b bis	2 h	3 - 4 h		
7	Bel. Art	SB + GSB				SB
8	Montage	nicht in Decke einlassen			direkt auf Konstruktionsbeton	

Abbildung A.2.26: Möglichkeiten der Leuchtenanordnung⁷⁹¹

⁷⁸⁹ vgl. HÖHNE, SCHRÖTER (2002), S. 45

⁷⁹⁰ vgl. CIE 189 (2010), S. 2

⁷⁹¹ FGSV (2006), S. 19

Die Vielzahl der Schnittstellen erfordert eine thematische Strukturierung in übergeordnete Themenbereiche. Dabei ermöglicht die Art der Schnittstellen eine Einteilung in die Bereiche: Beleuchtung, Verkehr und Bauwerk (Abbildung A.2.27).

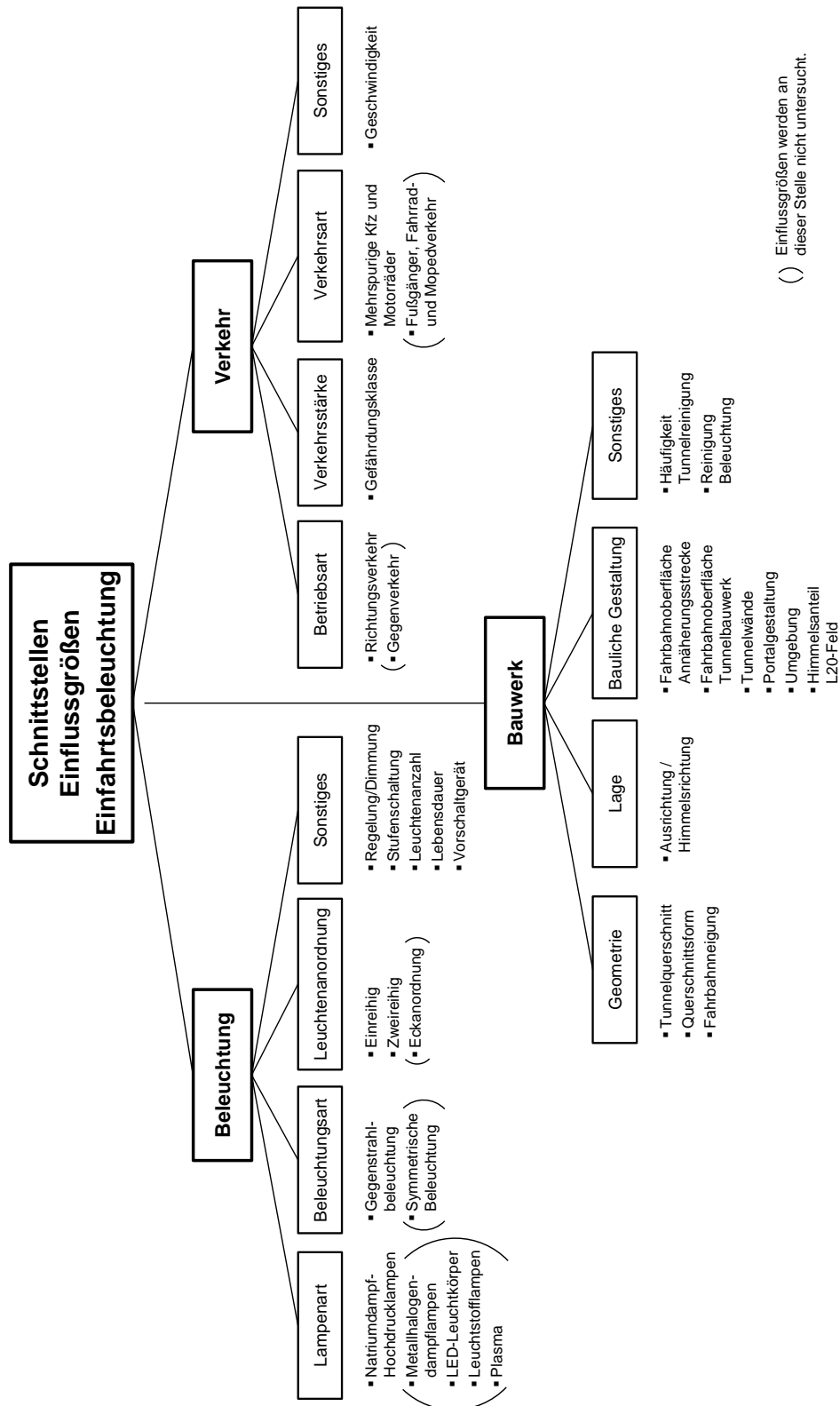


Abbildung A.2.27: Schnittstellen und Einflussgrößen der Einfahrtsbeleuchtung⁷⁹²

⁷⁹² in Anlehnung an SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 251

In Ermangelung einer ausreichenden Datengrundlage werden zur Eingrenzung der Schnittstellen für die weiteren Arbeitsschritte nachfolgend, mit Hilfe von Parameterstudien und Sensitivitätsanalysen, die wesentlichen Einflussgrößen herausgearbeitet. Einflussgrößen, die aus normativer Sicht auszuschließen sind (z. B. ist für die Einfahrtsbeleuchtung eine Gegenstrahlbeleuchtung vorzusehen, so dass eine symmetrische Beleuchtung nicht relevant werden kann), bleiben für die Bewertung unberücksichtigt.

Aufgrund der Komplexität der Berechnungen und dem damit verbundenen Aufwand bei der Durchführung einer Parameterstudie wird, wie in der Praxis üblich, auf eine Simulationssoftware zur Dimensionierung von Tunnelbeleuchtungsanlagen zurückgegriffen. Das hierfür gewählte Programm „ReluxTunnel“ ist eine Erweiterung der Licht- und Sensorplanungssoftware „ReluxSuite“ der Firma „Relux – light simulation tools“. Für die Untersuchungen findet die Version ReluxTunnel – 2012.2.0, mit einer Erweiterung um das Lampenset „Tunnelleuchten“ der Fa. Siteco, Anwendung. Die Dimensionierung der Beleuchtung erfolgt auf Basis einschlägiger Normen (CIE 88-2004, DIN 67524, SN 640090b).

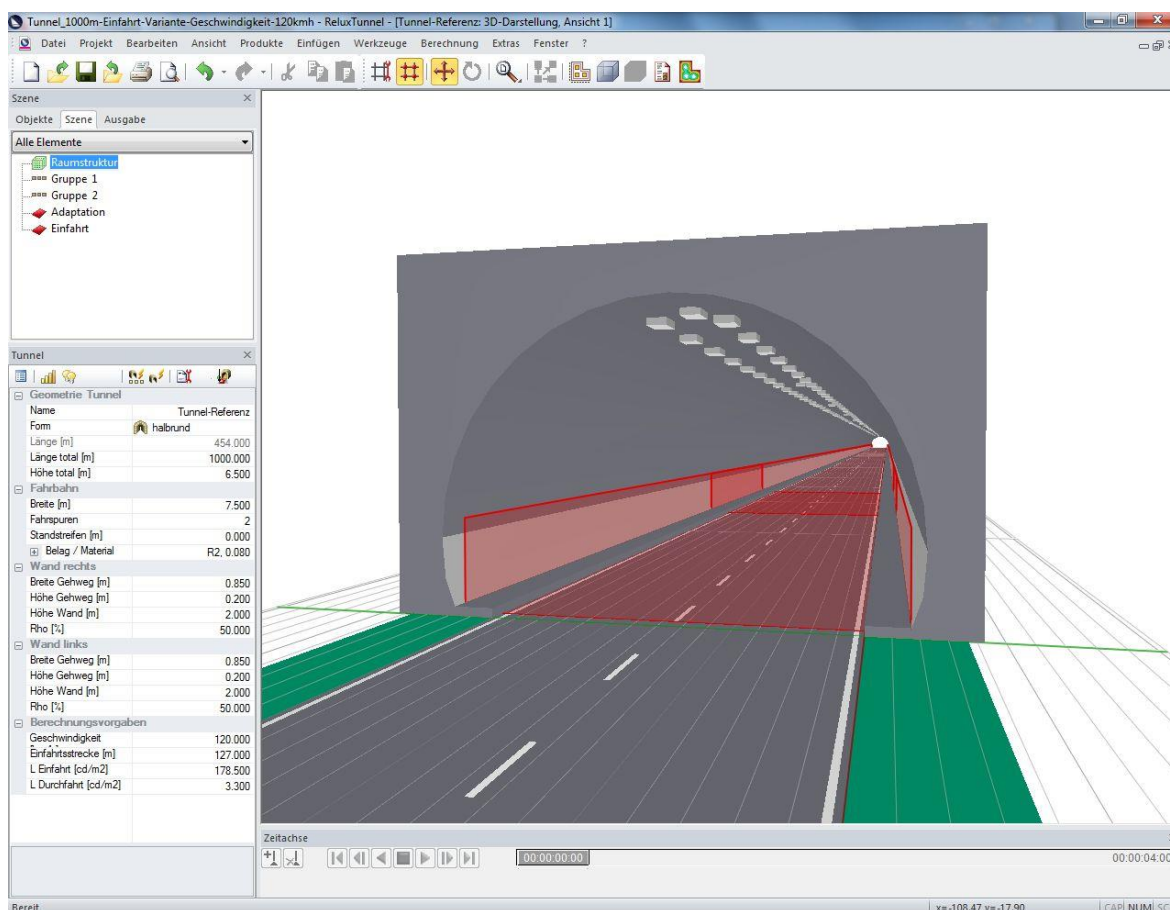


Abbildung A.2.28: Bildschirmausdruck Simulationssoftware ReluxTunnel

Durch Veränderung von Parametern bei der Programmeingabe kann eine Anpassung an die vorliegenden Randbedingungen bzw. normativen Vorgaben erfolgen. Die wesentlichen, programmtechnisch veränderlichen Parameter zur Berechnung der Beleuchtungsanlage sind in Tabelle A.2.5 zusammengestellt.

Tabelle A.2.5: Veränderliche Parameter Simulationssoftware „ReluxTunnel“

Parametergruppe	Parameter	Anpassungsspektrum
Tunnel	Querschnittsform	Rechteck, Gewölbe
	Länge	Gesamtlänge (beliebig)
		Einfahrtsbereich (Länge manuell anpassbar, max. gesamte Länge)
	Höhe	beliebig
Durchfahrts-geschwindigkeit	beliebig	
Fahrbahn	Breite gesamt	beliebig
	Anzahl Fahrspuren	beliebig
	Breite Standstreifen	beliebig
	Asphaltklasse	R1 – R4, C1 + C2
	q ₀	beliebig, unabhängig der Asphalt-klasse
Wand (links und rechts unabhängig voneinander)	Wandhöhe	beliebig
	Reflexionsgrad	0 – 100 %
Gehweg (s. Wände)	Höhe	beliebig
	Breite	beliebig
Mindestleuchtdichte	Einfahrtsstrecke	automatisch, beliebig variabel
	Innenstrecke	automatisch, beliebig variabel
Einfahrtsstrecke	Reaktionszeit	0 bis 100 s
	Längsneigung	-100 bis 100 %
	Geschwindigkeit	0 bis 200 km/h
	Leuchtdichteverhältnis	1:1 bis 1:10
	Exponent der Leuchtdichte-verlaufsgleichung	-10 bis 10
Messpunkte	Anzahl Messpunkte	3 bis 100
	Mindestlänge Messbereich	1 bis 100 m
	z-Position	0,001 bis 3
Leuchterschaltung	Art der Schaltung	Ein, Aus Ein, 50 %, Aus Dimmen 50 % Dimmen 30 %
Adaptionsbeleuchtung	Anzahl Schaltgruppen	1 bis 7
	Zusätzliche Schaltstufen	beliebig
Innenbeleuchtung	Anzahl Schaltgruppen	beliebig
	Anzahl Schaltstufen	beliebig

Aufbau eines Referenz隧nells

Um die Einflüsse der einzelnen Parameter differenziert herausstellen zu können, wird im Vorfeld ein Referenz隧nnel mit festen Randbedingungen definiert. Die Ausgestaltung basiert auf den Parametern des zu untersuchenden Mustertunnels. Grundlage bilden die normativen Vorgaben aus RVS 09.02.22, PLaPB – Tunnel-Beleuchtung, CIE 88, CIE 189, DIN 67524-1 und RABT 2006. Abstimmungsgespräche mit Planern und Tunnelbetreibern gewährleisten dabei die Konsistenz und den Praxisbezug der gewählten Parameter.

Untersucht wird ein Richtungsverkehrstunnel einer Bundesstraße mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h. Gewählt wird ein Gewölbequerschnitt mit einer lichten Höhe von 6,50 m. Die beiden Fahrspuren haben eine Breite von je 3,75 m. Zusätzlich wird auf beiden Seiten ein Notgehweg von 0,85 m Breite vorgesehen (Abbildung A.2.29). Die Länge des Tunnel wird mit 1.000 m angesetzt. Zur Bestimmung der erforderlichen Leuchtdichten (L_{20} , L_{fe} , L_{fi}) wurde auf das Näherungsverfahren nach RVS 09.04.41 zurückgegriffen. Weitere Ausgangsgrößen sind Tabelle A.2.6 zu entnehmen.

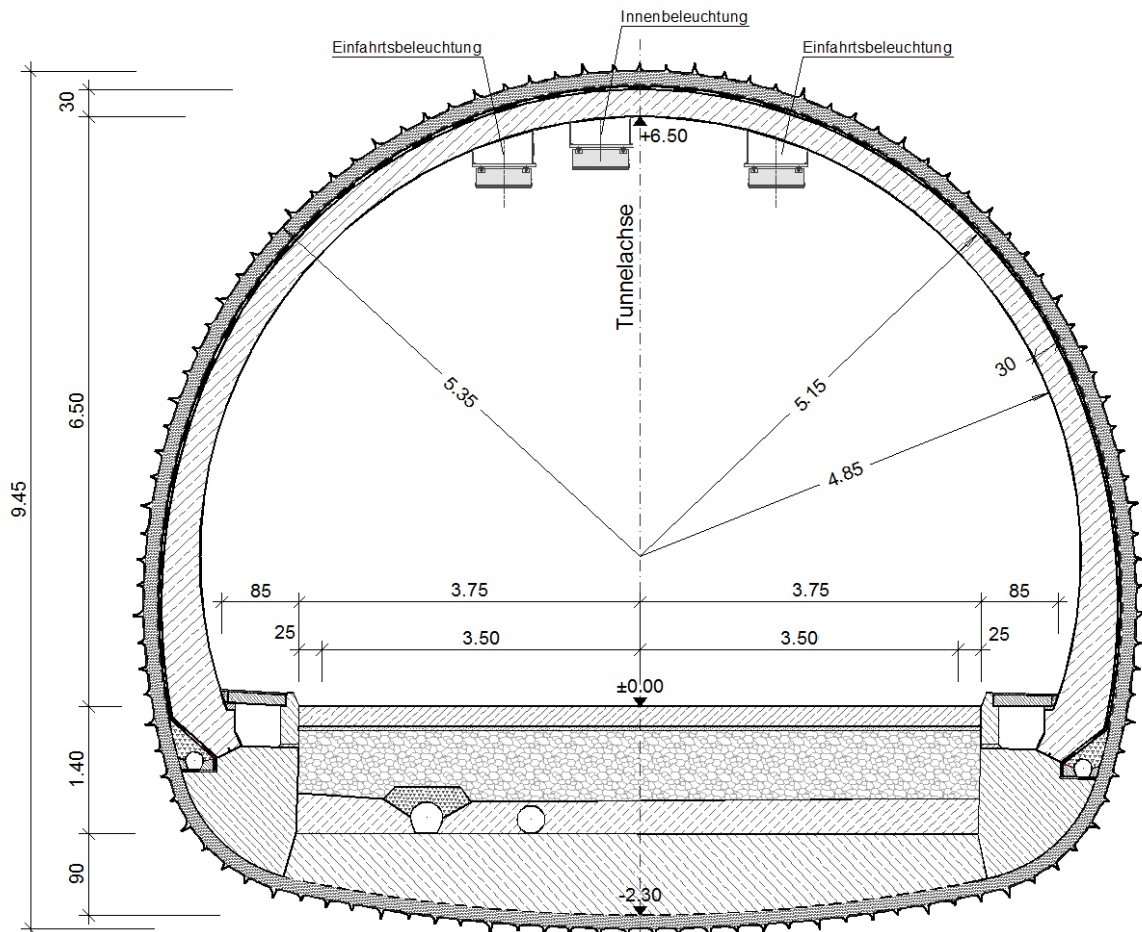


Abbildung A.2.29: Regelquerschnitt – Referenz隧nnel

Tabelle A.2.6: Ausgangsgrößen für Referenztunnel

	Parameter	Quelle	
Beleuchtung	Lampenart Natriumdampf-Hochdrucklampe 400 / 250 / 150 W	RVS 09.02.41, Abs. 3.2	
	Beleuchtungsart Gegenstrahlbeleuchtung (GSB)	RABT 2006, Abs. 3.3.1, PLaPB, Abs. 3.1.3	
	Leuchtenanordnung zweireihig		
	Steuerung Stufenschaltung - 8 Stufen	RVS 09.02.41, Abs. 5.2.1	
	Verkehr	Betriebsart Richtungsverkehr	
Verkehrsstärke / Gefährdungsklasse GK II ($k_{VS} = 0,55$)		RVS 09.02.31, Abs. 9	
Verkehrsart Mehrspurige Kfz und Motorräder ($k_{VA} = 1,0$)			
Geschwindigkeit $v = 100 \text{ km/h}$ ($k_{FG} = 1,0$); ($k_{GSB} = 0,050$)		RVS 09.02.41, Abs.4.1.2 und 4.2.1	
Bauwerk		Querschnitt	
	Breite Höhe Spuren 7,5 m 6,5 m 2		
	QS-Form Gewölbe		
	Beleuchtung - Wandbereich Höhe 2,00 m	RVS 09.02.41, Abs. 4.2	
	Neigung 0%		
	Haltesichtweite 94 m	RVS 09.02.41, Abs. 3.1.5	
	Fahrbahnoberfläche R2 $q_0 = 0,08$	RVS 09.02.41, Abs. 2.2	
	Himmelsrichtung West ($k_{FR} = 1,7$)	RVS 09.02.41, Abs. 4.1.2	
	Himmelsanteil 10% ($k_{HA} = 1,05$)	RVS 09.02.41, Abs. 4.1.2	
	Sonstiges	Leuchtdichte Annäherungsstrecke L_{20} 3.570 cd/m ² (2.000 x 1,05 x 1,7 x 1,0 x 1,0)	RVS 09.02.41, Abs. 4.1.2
		Leuchtdichte Einsichtsstrecke L_{fe} 178,5 cd/m ² (3.570 x 0,05)	RVS 09.02.41, Abs. 4.2.1
Leuchtdichte Innenstrecke L_{fi} 3,3 cd/m ² (6 x 0,55 x 1,00 x 1,00)		RVS 09.02.41, Abs. 4.3	
Leuchtdichte am Ende der Übergangsstrecke 9,9 cd/m ² (3:1 - L_{fi})		RVS 09.02.41, Abs. 4.2.2	
Reinigung Tunnel (Reflexionsgrad) 0,50 (12x pro Jahr)		DIN 67524-1, Anhang B	
Wartung Leuchten (Wartungsfaktor) 0,70		RVS 09.02.41, Abs. 3.2	

Dimensionierung der Einfahrtsbeleuchtung für den Referenztunnel

Die Dimensionierung der Einfahrtsbeleuchtung erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware ReluxTunnel. Dabei liegt der Fokus weniger auf einer vollständigen, detailgetreuen Planung der Beleuchtungsanlage. An dieser Stelle soll lediglich eine Abschätzung der Einflüsse verschiedener Parameter herausgearbeitet werden. Aus diesem Grund wird die vom Programm eigenständig ermittelte erforderliche Systemleistung (in kW) als Vergleichsmaßstab herangezogen. Auf eine exakte Ausarbeitung wird verzichtet. Allerdings erfolgt eine Prüfung der Berechnungsergebnisse auf Basis der wesentlichen Planungskriterien (gemäß RVS 09.02.41 bzw. CIE 88):

- Blendungsbegrenzung/Schwellenwerterhöhung TI (RVS 09.02.41, Abs. 3.2.3)

$$TI = 95 \cdot \frac{L_S}{L_{fx}}^{1,05} < 15 \% \quad \text{für } L_{fx} > 5 \text{ cd/m}^2 \quad (\text{A.2.39})$$

$$TI = 65 \cdot \frac{L_S}{L_{fx}}^{0,8} < 15 \% \quad \text{für } L_{fx} \leq 5 \text{ cd/m}^2 \quad (\text{A.2.40})$$

L_S = Schleierleuchtdichte

L_{fx} = Fahrbahnleuchtdichte des entsprechenden Tunnelabschnittes

- Kontrastgütekoeffizient q_c (RVS 09.02.41, Abs. 3.3.1)

$$q_c = \frac{L_{fe}}{E_{v+}} \geq 0,5 \text{ cd/m}^2\text{lx} \quad \text{Gegenstrahlbeleuchtung} \quad (\text{A.2.41})$$

$$q_c = \frac{L_{fe}}{E_{v+}} \leq 0,5 \text{ cd/m}^2\text{lx} \quad \text{symmetrische Beleuchtung} \quad (\text{A.2.42})$$

L_{fe} = Fahrbahnleuchtdichte

E_{v+} = mittlere Vertikalbeleuchtungsstärke

Zusätzlich sind die Tunnelwände mit mindestens 50 % der Fahrbahnleuchtdichte zu beleuchten. Gleichzeitig gilt es eine Längsgleichmäßigkeit von mindestens 40 % zu einzuhalten.⁷⁹³

Auszug aus dem Ergebnisplot für den Referenztunnel:⁷⁹⁴

Leuchtenreihe: Band 2.1	
Anzahl Leuchten: 76	Systemleistung (gesamt): 20.8kW
Grundposition: x=2.00m y=3.00m, z=6.30m	-variable Abstände-
Leuchtdrehung: z=180.0° C0=0.0° C90=0.0°	
Leuchtenreihe: Band 2.2	
Anzahl Leuchten: 76	Systemleistung (gesamt): 20.8kW
Grundposition: x=2.00m y=4.50m, z=6.30m	-variable Abstände-
Leuchtdrehung: z=180.0° C0=0.0° C90=0.0°	

Abbildung A.2.30: Systemleistung Einfahrtsbeleuchtung (Referenztunnel)

⁷⁹³ vgl. FSV (2014)A, S. 18

⁷⁹⁴ Die vollständigen Ergebnisse der einzelnen Simulationsläufe sind dem beiliegenden Datenträger zu entnehmen.

Schaltstufe: S1: 100%			
Adaptation			
1:	100%		
2:	100%		
3:	100%		
4:	100%		
Innenbel.			
5:	100%		
Einfahrt, Einfahrtbereich (konstant)			
Messbereich: 15.90 m - 32.58 m Punkte: nx = 7, ny = 6, nz = 3			
Beobachter : x = -44.10 m; z = 1.50 m dx = 61.19 m (fix)			
	y = 1.88 m	y = 5.63 m	
Fahrbahn (R2, q0 = 0.08)			
Lm	: 180.56 cd/m ²	180.56 cd/m ²	
Uo	Lmin/Lm : 0.70	0.70	0.4
Ul	Lmin/Lmax : 0.98	0.98	0.6
qc(av)	: 0.81 cd/m ² /lx	0.81 cd/m ² /lx	0.5 cd/m ² /lx
TI max.	Max. : 2.16 %	2.16 %	15 %
B	Max. : 0.02	0.02	0.15
Wand links (diffus 50%)			
Lm	: 163.67 cd/m ²	163.67 cd/m ²	
Uo	Lmin/Lm : 0.91	0.91	
Wand rechts (diffus 50%)			
Lm	: 163.67 cd/m ²	163.67 cd/m ²	
Uo	Lmin/Lm : 0.91	0.91	
Beleuchtungsstärke			
Fahrbahn			
Em	1944.85 lx		
Uo	Emin/Em : 0.88		
Wand links		Wand rechts	
Em	1028.32 lx	Em	1028.32 lx
Uo	Emin/Em : 0.91	Uo	Emin/Em : 0.91

Kontrollgrößen



Abbildung A.2.31: Prüfkriterien für Schaltstufe 1 – 100 % (Referenztunnel)

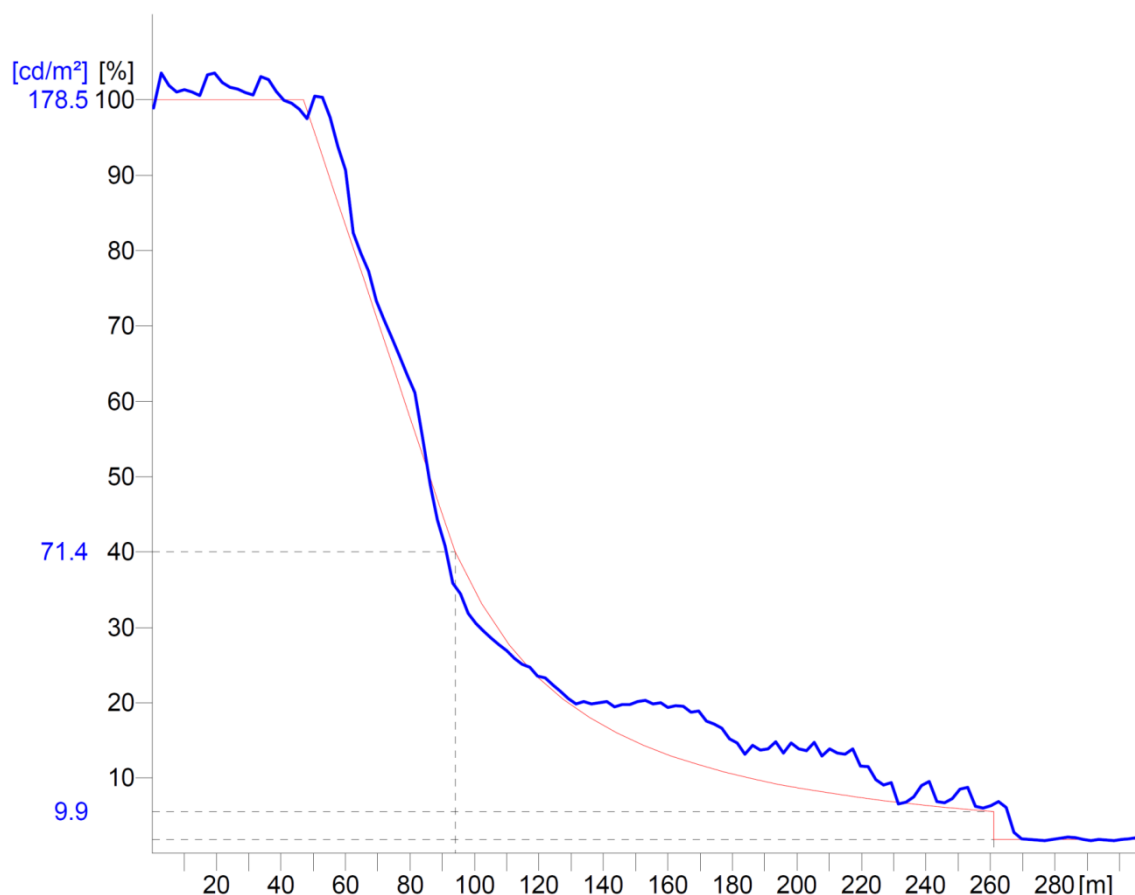


Abbildung A.2.32: Verlauf der Leuchtdichte für Schaltstufe 1 – 100 % (Referenztunnel)

Als Ausgangsbasis für die Parameterstudie wurde für die Einsichtsstrecke eine Beleuchtungsanlage mit einer Systemleistung vom $2 \times 20,8 = 41,6$ kW ermittelt (Abbildung A.2.30). Die einzelnen Prüfkriterien wurden dabei eingehalten (Abbildung A.2.31). Der Verlauf der Leuchtdichte kann für die an dieser Stelle vernachlässigte Genauigkeit als ausreichend angesehen werden (Abbildung A.2.32).

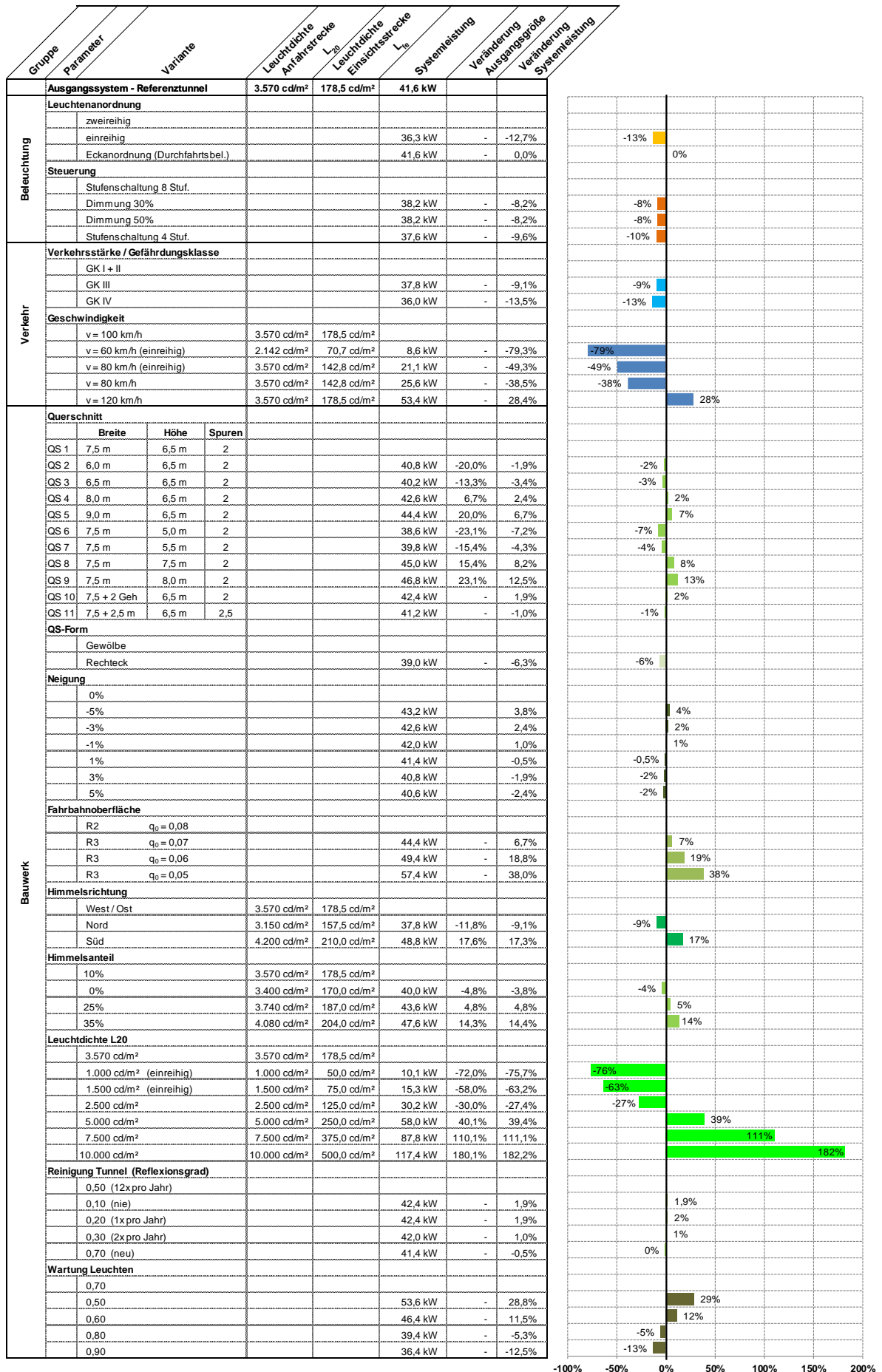
Ergebnisse der einzelnen Varianten

Die Ergebnisse der einzelnen Rechenläufe sind nachfolgend in Tabelle A.2.7 zusammengefasst.⁷⁹⁵ Für die Auswertung wurde die jeweils berechnete Systemleistung dem Ergebnis des Referenztunnels gegenübergestellt und die Veränderung bestimmt.

Für Varianten, bei denen sich die Leuchtdichte der Anfahrstrecke L_{20} und dadurch auch die Leuchtdichte der Einsichtsstrecke L_{fe} verändert haben, wurden diese Werte ebenfalls in die Auswertung aufgenommen. Grund hierfür sind die Untersuchungen des Einflusses der Leuchtdichte L_{20} , wo sich ein nahezu linearer Zusammenhang zeigt.

⁷⁹⁵ Die einzelnen Ergebnisplots sowie die zugehörigen Berechnungsdateien aller untersuchten Varianten können dem beiliegenden Datenträger entnommen werden.

Tabelle A.2.7: Ergebnisse der Parameterstudie für die Schnittstellen der Einfahrtsbeleuchtung



Zusammenstellung der wesentlichen Schnittstellen

Die Ergebnisse der Parameterstudie lassen vier wesentliche Einflussgrößen erkennen.

Am deutlichsten ist der Einfluss der **Außenleuchtdichte** L_{20} und der damit in Verbindung stehenden **Leuchtdichte in der Einsichtsstrecke** L_{fe} . Dabei lässt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen Leuchtdichte und Systemleistung ableiten. Grund für den signifikanten Einfluss sind der erhöhte Leuchtdichtebedarf und die sich dadurch verlängernde Adaptionsstrecke. Die Leuchtdichte L_{20} wird durch die **Portalgestaltung**, die Gestaltung der Annäherungstrecke sowie die **Himmelsrichtung** beeinflusst.

Zweite wesentliche Einflussgröße ist die zulässige **Höchstgeschwindigkeit**. Sie hat sowohl Auswirkung auf die erforderliche Leuchtdichte als auch auf die Länge der Haltesichtweite. Beide Faktoren führen zu einer Verlängerung der gesamten Einfahrstrecke.

Neben einer ausreichenden Helligkeit, sind die **Reflexionseigenschaften** der Fahrbahn und der Tunnelwände für die Erzielung einer ausreichenden Kontraststärke verantwortlich. In der Parameterstudie wurde dies durch Variation der Fahrbahnoberfläche deutlich. Je heller der Belag, desto geringer ist die erforderliche Systemleistung. Für die Tunnelwände konnte dieser Effekt nicht so deutlich herausgearbeitet werden. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass programmintern ein konstanter Leuchtdichtekoeffizient von $0,2 \text{ cd/m}^2\text{lx}$ für die Tunnelwände Berücksichtigung findet. Erfahrungen aus der Praxis zeigen allerdings, dass durch Reinigung der Wandoberflächen Energieeinsparungen von rund 15 % bis 20 % zu verzeichnen sind, was die Relevanz der Reflexionseigenschaften der Tunnelwände belegt.⁷⁹⁶

Der **Wartungsfaktor** zeigt ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die erforderliche Systemleistung und ist in die weiteren Betrachtungen einzubeziehen. Dieser dient dazu, mindernde Einflüsse hinsichtlich der Lichtausbeute in der Bemessung der Beleuchtungsanlage zu berücksichtigen (Abbildung A.2.33). Dabei werden die vorgesehenen Maßnahmen zur Wartung der Lampen, der Leuchten sowie der Umgebungsoberfläche (Wände und Fahrbahn) in einem gemeinsamen Faktor zusammengefasst.⁷⁹⁷

$$MF = LLMF \cdot LSF \cdot LMF \cdot SMF \quad (\text{A.2.43})$$

Dabei gilt:

- MF = Wartungsfaktor (Maintenance Factor)
- LLMF = Lampenlichtstromwartungsfaktor (Lamp Lumen Maintenance Factor)
- LSF = Lampenlebensdauerfaktor (Lamp Survival Factor)
- LMF = Leuchtenwartungsfaktor (Luminaire Maintenance Factor)
- SMF = Oberflächenwartungsfaktor (Surface Maintenance Factor)

Der LLMF beschreibt den Rückgang der Leuchtstärke der Lampe über deren Einsatzzeitraum. Er ist aus den Lichtstromrückgangskurven, z. B. nach Herstellerangabe bzw. RVS 09.04.41, Abs. 3.2.1, für den jeweiligen Betrachtungszeitpunkt zu bestimmen. Zur Dimensionierung der Beleuchtungsanlage ist dabei auf die zu erwartende Lebensdauer des Leuchtmittels abzustellen, da zu jedem Betriebszeitpunkt die geforderte Leuchtdichte aufgebracht werden muss.⁷⁹⁸

⁷⁹⁶ Nicht protokollierte Aussage eines Tunnelbetreibers im Zuge eines Abstimmungsgesprächs.

⁷⁹⁷ vgl. CIE 154 (2003), S. 9 f.

⁷⁹⁸ vgl. CIE 154 (2003), S. 3; FSV (2014)A, S. 11

Der LSF ermittelt sich aus den bis zum Betrachtungszeitpunkt bereits ausgefallenen Lampen und bildet dadurch die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Leuchte ab.⁷⁹⁹

Der LMF beschreibt den Einfluss der Verschmutzung einer Leuchte und ihrer Bestandteile (Linse, Leuchtmittel, Refraktor, Reflektorspiegel usw.) auf deren Lichtstrom. Ausgehend von der Verschmutzungskategorie, der Schutzart der Leuchte (z. B. IP 66 - staubgeschützt und Schutz gegen Strahlwasserdruck)⁸⁰⁰ und der Reinigungshäufigkeit kann dieser Faktor nach CIE 154 bzw. Herstellerangaben festgelegt werden.⁸⁰¹

Der SMF beschreibt die Abnahme des Reflexionsgrades der Umgebungsoberflächen. Durch Tunnelreinigung, insbesondere der Tunnelwände, die durch Ruß- und Staubablagerungen ihre Reflexionseigenschaften einbüßen, wird dabei angestrebt, eine hohe Fahrbahnleuchtdichte dauerhaft aufrechtzuerhalten.⁸⁰²

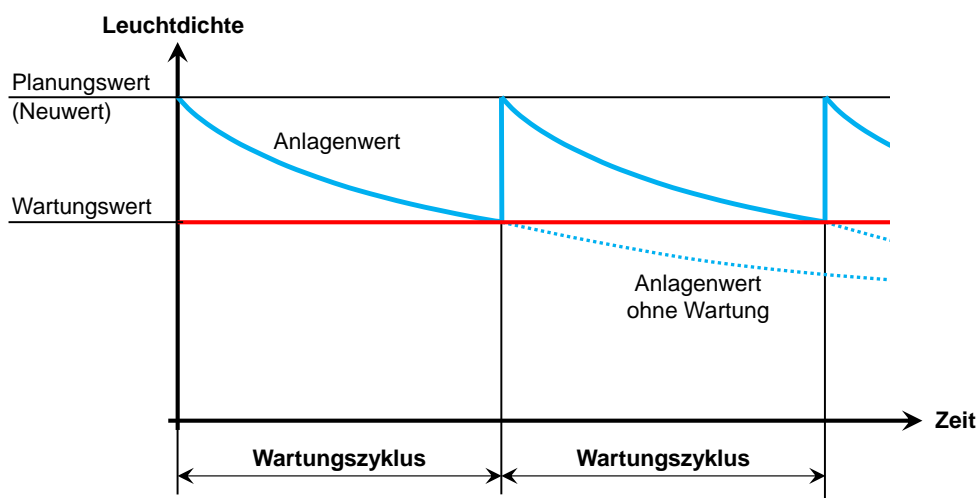


Abbildung A.2.33: Rückgang der Leuchtdichte über die Betriebszeit⁸⁰³

Die **Betriebsart** (Gegen- oder Richtungsverkehrstunnel) ist aufgrund der Größe der Systemleistung für die Einfahrtsstrecke grundsätzlich von Relevanz. Allerdings ist eine Einfahrtsbeleuchtung für jede Fahrtrichtung vorzusehen, sowohl bei Anordnung nur einer Tunnelröhre (Gegenverkehrstunnel) als auch bei zwei Tunnelröhren (Richtungsverkehr) – dann in getrennten Röhren. In der globalen Betrachtung wäre somit kein Unterschied auszumachen. Jedoch wird in Richtungsverkehrstunnels am eigentlichen Ausfahrtsportal mitunter eine Einfahrtsbeleuchtung vorgesehen, um für bestimmte Situationen den Tunnel im Gegenverkehr betreiben zu können. Dies hätte Einfluss auf den Unterhalt (Inspektion, Wartung usw.).

Zusätzlich zum eigentlichen Leuchtmittel, ist zur Bestimmung des Gesamtenergieverbrauchs, der aus dem notwendigen **Vorschaltgerät** erforderliche Energiebedarf einzubeziehen. Wesentlich dabei ist die Art des Vorschaltgerätes. Während Konventionelle Vorschaltgeräte (KVG) eine Verlustleistung von 10-20% der Aufnahmeleistung besitzen, konnte dies durch Verlustarme Vorschaltgeräte (VVG) reduziert werden (ca. 10%). Elektronische Vorschaltgeräte (EVG), als neuste Entwicklungsstufe, ermöglichen durch eine veränderte Betriebstechnik (höhere Frequenz) eine Reduzierung der Energieaufnahme,

⁷⁹⁹ vgl. CIE 154 (2003), S. 3 f.

⁸⁰⁰ vgl. FSV (2014)A, S. 23

⁸⁰¹ vgl. CIE 154 (2003), S. 4

⁸⁰² vgl. CIE 154 (2003), S. 9 f.; Erläuterung abgeleitet aus CIE 97 (2005), S. 11

⁸⁰³ entwickelt aus DIN EN 13201 (2004), S. 6; in Anlehnung an CIE 154 (2003), S. 2; TRILUX (2005), S. 24

bei gleicher Lichtleistung. Durch die ausschließlich elektronische Regelung (kein Eisenkern wie bei KVG und VVG) ist zu dem die Lebensdauer deutlich höher.⁸⁰⁴ Grundsätzlich sind diese Werte herstellerabhängig und für eine Vergleichbarkeit aufzunehmen.

In Bezug auf die Wechselwirkung mit anderen Modulen und deren Prozesse lassen die gewonnenen Erkenntnisse der Parameterstudie folgende Interdependenzen erkennen:

- Durch Module rund um die Portalgestaltung (Sonnensegel, Tunnelportal, Fahrbahn usw.), lässt sich insbesondere die vorhandene Leuchtdichte in der Annäherungstrecke L_{20} und dadurch die erforderliche Systemleistung gezielt reduzieren.
- Die Innenschale bzw. eine zusätzliche Beschichtung ermöglichen eine Reduzierung des Energiebedarfs zur Erzielung der notwendigen Fahrbahnleuchtdichte. Zusätzlich können durch die Prozesse der Reinigung, der Instandsetzung oder Erneuerung der Energiebedarf (Prozess Versorgung) oder auch die Systemgröße der Beleuchtung beeinflusst werden.
- Über die Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelages kann ebenfalls Einfluss auf die Einfahrtsbeleuchtung genommen werden. Sowohl durch die Wahl des Materials als auch durch Reinigung bzw. Instandhaltung oder Austausch der obersten Deckschicht.

Modulinterne Schnittstellen sind über den Wartungsfaktor und dem zugrundeliegenden Wartungsplan (mit Reinigung und Wartung) sowie der Systemleistung bzw. des Energiebedarfs zu erkennen.

Neben den aus der Parameterstudie ermittelten Einflussgrößen, ist die Anzahl der Leuchten eine maßgebliche Größe für die Wartung, Inspektion, Instandsetzung und den Austausch der Leuchten. Insbesondere die zeitlichen Aufwendungen für die jeweilige Leistung einer einzelnen Leuchte sind dabei von entscheidender Bedeutung.

Zusätzlich prägt die Nutzungsdauer der Lampen, Leuchten und Sensoren die Häufigkeit des Leuchtmittelaustausches bzw. der Erneuerung.

A.2.2.1.9 Schnittstellen

Planung & Umsetzung:

Die Kosten für die Planung und den Einbau werden durch die erforderliche Leuchtdichte und damit durch die Anzahl der Leuchten sowie die Länge der Einsichtsstrecke bestimmt (Systemleistung). Die Systemleistung der Beleuchtungsanlage wiederum wird wesentlich durch die Parameter Außenleuchtdichte L_{20} , zulässige Höchstgeschwindigkeit, Reflexionseigenschaften der Oberflächen (Fahrbahn und Tunnelwand) sowie der planmäßigen Wartung der Leuchten beeinflusst. Die Ausrichtung der Tunnelachse im Bereich der Portale hat ebenfalls Einfluss auf die erforderliche Systemleistung. Eine zusätzliche kostenbeeinflussende Größe stellt die Art der verwendeten Leuchten (HST, LED, Leuchtstoffröhren) dar.

Schnittstellen zu anderen Modulen bestehen insbesondere zu Elementen, die die erforderliche Leuchtdichte und damit die Kosten für Planung und Umsetzung beeinflussen. Wesentlich dabei ist die Außenleuchtdichte – bestimmt durch die Portalgestaltung, etwaige Sonnensegel im Portalbereich, Fahrbahn- und Wandgestaltung auf der Annäherungstrecke. Aber auch durch die Ausgestaltung der Oberflächen im Tunnel (helle

⁸⁰⁴ vgl. HAUCK (2013); RINGWALD, RÖNITZSCH, RIEDEL (2013); RIESTE (2014)

Tunnelwände, Beschichtung, Fahrbahn) oder durch verstärktes reinigen der Oberflächen zur Verbesserung der Reflexionseigenschaften ist eine Reduzierung der erforderlichen Leuchtdichte zu erzielen.

Versorgung:

Die durch die Energieversorgung erzeugten Kosten werden über den Energiebedarf und den zu entrichtenden Energiepreis bestimmt. Der Energieverbrauch resultiert aus der erforderlichen Leuchtdichte, der Anzahl der Leuchten und deren jährliche Brenndauer sowie dem Energiebedarf der einzelnen Leuchte (inkl. Vorschaltgerät). Die maßgeblichen Parameter der Systemleistung – zusammengesetzt aus der Leuchtdichte, Anzahl der Leuchten und deren Leistung – sind ebenfalls wesentliche Größen für die Planung und Umsetzung und wurden dort bereits vorgestellt.

Der Energiepreis ist abhängig von dem Energieversorger, der Marktlage, der Abnahmemenge sowie weiteren Faktoren, die hier nicht erhoben werden sollen. An dieser Stelle soll vom Energiepreis als eigenständige Größe ausgegangen werden.

Umgekehrt hat der Energiebedarf Einfluss auf die Auslegung der Unabhängigen Stromversorgung (USV), zur Gewährleistung eines Notbetriebs. Je geringer der Leistungsbedarf der Beleuchtungsanlage, desto geringer kann die USV-Anlage dimensioniert werden.

Reinigung:

Die Kosten für die Reinigung der Tunnelleuchten werden maßgeblich durch die Anzahl der Leuchten und daraus resultierend aus dem zeitlichen Aufwand bestimmt. Die im Wartungsplan vorgesehenen Reinigungsintervalle fakturieren die Reinigungskosten über die jährliche Häufigkeit.

Inspektion:

Die Kosten der Inspektion sind geprägt durch den zeitlichen Umfang der einzelnen Leistungen. Art und Häufigkeit werden dabei durch gesetzliche, normative bzw. betreiberspezifische Regelungen vorgegeben (Instandhaltungsstrategie).

Wartung:

Die Kosten für den Leuchtmitteltausch werden durch den zeitlichen Aufwand für den Wechsel sowie den Kosten des zu wechselnden Leuchtmittels bestimmt. Die Anzahl und Lebensdauer der Leuchtmittel sind dabei entscheidende Faktoren für die Häufigkeit der Wartungsarbeiten, so dass auch hier die Einflussgrößen für die Systemleistung einzubeziehen sind.

Instandsetzung:

Die Ausfallrate von Leuchten und Leuchtmitteln als Qualitätsmerkmal und damit einhergehend die Anzahl der auszuwechselnden Leuchten und Leuchtmittel sowie der dafür notwendige Zeitaufwand bestimmen im Wesentlichen die Instandsetzungskosten. Dabei fließt die vorgesehene Instandhaltungsstrategie mit ein.

Erneuerung:

Die Schnittstellen für die Kosten zur Erneuerung der Beleuchtungsanlage sind vergleichbar mit den Schnittstellen für die Planung und Umsetzung in der Herstellungsphase. Die Häufigkeit ist geprägt durch den Erneuerungszyklus und hängt von der Lebens- bzw. der geplanten Nutzungsdauer der Leuchten bzw. der Sensorik ab.

A.2.2.2 Modul Innenbeleuchtung

A.2.2.2.1 Beschreibung

Der Innenbeleuchtung kommt, ebenso wie der Einfahrtsbeleuchtung, die Aufgabe zu, ausreichend visuelle Informationen über die anstehende Fahrstrecke zur Verfügung zu stellen. Ziel ist es, kritische Situationen bereits im Vorfeld zu vermeiden. Zur Gewährleistung einer durchgängigen Ausleuchtung schließt die Beleuchtung der Tunnelinnenstrecke unmittelbar an die veränderliche Einfahrtsbeleuchtung an (Abbildung A.2.21).

Nach Durchfahren der Einfahrtsstrecke ist der Adaptionsvorgang bereits abgeschlossen. Das menschliche Auge ist bereits an die dunklere Umgebung gewöhnt. Die erforderliche Leuchtdichte der Innenstrecke (L_{fi}) ist deshalb gegenüber der Einfahrtszone deutlich reduziert.⁸⁰⁵ Das Beleuchtungsniveau orientiert sich an einer ausreichenden Sichtweite (geschwindigkeitsabhängig) sowie dem Verkehrsaufkommen. Bei sehr langen Tunnelbauwerken kann die erforderliche Leuchtdichte nach normativen Vorgaben abgemindert werden.⁸⁰⁶

$$L_{fi} = 6 \cdot k_{VS} \cdot k_{FG} \cdot k_{VA} \quad (\text{A.2.44})$$

mit:

L_{fi} [cd/m ²]	Leuchtdichte der Innenstrecke
k_{VS} [-]	Faktor Verkehrsstärke
k_{FG} [-]	Faktor erlaubte Höchstgeschwindigkeit
k_{VA} [-]	Faktor Verkehrsart

Tunnelbauwerke, die tagsüber einer Beleuchtung bedürfen, sind während den Nachtstunden ebenfalls zu beleuchten. Hierbei kann auf eine Adaption im Einfahrtsbereiche verzichtet werden. Über die gesamte Bauwerkslänge ist lediglich ein gleichmäßiges Leuchtdichteniveau durch die Innenbeleuchtung sicherzustellen.⁸⁰⁷ Ist das Tunnelbauwerk dabei im Zuge einer unbeleuchteten Straße angeordnet, ist die Leuchtdichte der Innenstrecke über den Tagesverlauf nach folgender Formel zu bestimmen.⁸⁰⁸

$$L_{Tag} = L_{fi} \cdot k_{red} \quad (\text{A.2.45})$$

mit:

L_{Tag} [cd/m ²]	Leuchtdichte im Tagesverlauf
L_{fi} [cd/m ²]	Leuchtdichte der Innenstrecke
k_{red} [-]	Reduktionsfaktor (Tabelle A.2.8)

Während den Nachtstunden ist bei beleuchteten Straßenzügen die Leuchtdichte der Anschlussstrecken über die gesamte Tunnelstrecke aufzubringen.⁸⁰⁹

⁸⁰⁵ vgl. FGSV (2006), S. 17 f.; FSV (2014)A, S. 17 ff.

⁸⁰⁶ Nach RVS 09.02.41 ist nach 2,5 km eine Abminderung von L_{fi} um 50 % möglich.

Gemäß DIN 67524-1 kann bei Tunneln mit einer Länge von über 2,5 km die Leuchtdichte nach 500 m um bis zu 2/3, jedoch nicht unter 1 cd/m² reduziert werden.

vgl. FSV (2014)A, S. 18 bzw. DIN 67524-1 (2008), S. 16

⁸⁰⁷ vgl. CIE 88 (2004), S. 17

⁸⁰⁸ vgl. FSV (2014)A, S. 18

⁸⁰⁹ vgl. FSV (2014)A, S. 18

Tabelle A.2.8: Reduktionsfaktor der Leuchtdichte der Innenstrecke L_{fi} im Tagesverlauf⁸¹⁰

Beleuchtungsstärke E_A [lx]	Tageszeit	Zusatzkriterium [Kfz/h]	Reduktionsfaktor k_{red} [-]
> 100			1,00
≤ 100	04:00 bis 08:00 16:00 bis 22:00		0,50
	22:00 bis 04:00	> 100	0,25
	22:00 bis 04:00	≤ 100	0,125

Die abschließende Ausfahrtsstrecke ist in die Innenstrecke integriert (Abbildung A.2.21). Sie bildet den Übergang zum weitaus helleren Außenbereich. Der Beginn der Ausfahrtsstrecke ist so definiert, dass ab dieser Stelle das Sehvermögen bzw. die Adaptionsleuchtdichte durch die Helligkeit außerhalb des Tunnels beeinflusst wird. Durch die vergleichsweise schnelle Anpassungsfähigkeit des menschlichen Auges, bei einer Veränderung der Helligkeit von Dunkel zu Hell, kann oftmals auf eine Anpassung des Beleuchtungsniveaus (gegenüber der Tunnelinnenstrecke) verzichtet werden.⁸¹¹

In Sonderbereichen, wie z. B. bei zusätzlichen Ein- und Ausfahrten oder Pannenbuchten, wird das Beleuchtungsniveau, aufgrund erhöhter Gefahrenpotentiale, örtlich angehoben. Dies wird durch zusätzliche Leuchten gewährleistet, die in gesonderten Modulen zu erfassen sind.

Für die Innenbeleuchtung des vorliegenden Projektes gelten folgende Grundparameter:

- Natriumdampf-Hochdrucklampen als symmetrische Beleuchtung (SB)
- Leuchtenanordnung einreihig an der Tunnelfirste – versetzt zur Tunnelachse (Abbildung A.2.22)
- Lichtpunkthöhe: 6,00 m
- Stufenschaltung mit 4 Helligkeitsstufen (100 %, 75 %, 50 %, 25 %)
- Betriebswerte Leuchtdichte:

Einstreichstrecke – Westportal (Südröhre)	$L_{BE,fe,W} =$	174,0 cd/m ²
Einstreichstrecke – Ostportal (Nordröhre)	$L_{BE,fe,O} =$	178,5 cd/m ²
Innenstrecke – Tag (Nord- und Südröhre)	$L_{BE,fi} =$	3,3 cd/m ²
Reduktionsfaktor für Nachtbetrieb (Tabelle A.2.8): ⁸¹²		
04:00 bis 08:00 Uhr und 16:00 bis 22:00 Uhr	$k_{red} =$	0,50
22:00 bis 04:00 Uhr	$k_{red} =$	0,25
- Planungsfaktor $L_{PL} = 0,70$
- Tunnellänge: 2.400 m
- Fahrbahnoberfläche: Betonfahrbahn – Belagsklasse R2, $q_0 = 0,08$ cd/m²lx
- Tunnelwand: Sichtbeton, $q_0 = 0,20$ cd/m²lx (Reflexionsgrad 0,5)
- zul. Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h
- Gefährdungsklasse II

⁸¹⁰ FSV (2014)A, S. 18

⁸¹¹ vgl. DIN 67524-1 (2008), S. 22 f.; FSV (2014)A, S. 18

⁸¹² vgl. FSV (2014)A, S. 18

A.2.2.2.2 Definition und Abgrenzung des Moduls

Die Innenbeleuchtung hat die technisch-funktionale Aufgabe ausreichende Sichtverhältnisse im Tunnelinneren, auch während der Nachtstunden, sicherzustellen. Durch den Nachtbetrieb sowie den gleichmäßigen Leuchtdichteverlauf ist sie abgegrenzt und damit unabhängig von der Einfahrtsbeleuchtung zu betreiben. Zusätzliche Abgrenzungsmerkmale sind maßgebliche Einflussgrößen gegenüber anderen Beleuchtungskomponenten, wie beispielsweise die Haltesichtweite oder die Verkehrsstärke.

Funktionale Unabhängigkeit

Ein eigenständiger Leuchtdichtebedarf sowie eine separate Steuerung gewährleisten die funktionale Unabhängigkeit. Die technisch-funktionale Aufgabe (s. o.) ist deutlich zu artgleichen Modulen abgegrenzt. Die zentralen Elemente der Steuerung (Leuchtdichtemessgerät usw.) sind im Modul integriert. Einzig die Stromversorgung und die übergeordnete, softwaregestützte Steuerung erfolgen extern.

Physische Unabhängigkeit

Die Leuchten der Innenbeleuchtung sind mit Hilfe einer tragfähigen Leuchtenunterkonstruktion an der Tunneldecke zu befestigen.⁸¹³ Zur Austauschbarkeit hat dies durch eine reversible Verschraubung zu erfolgen. Ebenso sind die Leuchtdichtemessgeräte und die Kabelrinnen lösbar an der Innenschale zu befestigen. Die Möglichkeit zur gegenständlichen Trennung wird dadurch gewährleistet. Das Kriterium der physischen Unabhängigkeit gilt als erfüllt.

Integrität

Ausgenommen der Stromversorgung und der softwaregestützten Steuerung umfasst das Modul alle für den Betrieb erforderlichen Elemente. Eine Aggregation zu einem übergeordneten Untersuchungsrahmen ist durch die Eigenständigkeit gegeben.

A.2.2.2.3 Elemente

Die Innenbeleuchtung ist als symmetrische Beleuchtung mit Natriumdampf-Hochdrucklampen (HST) ausgebildet. Die Messung und Steuerung der Leuchtdichte erfolgt über Leuchtdichtemesssensoren. Das Modul umfasst dabei folgende wesentliche Elemente:

- 2 x 138 Spezialtunnelleuchte 150 W (HST), einflammig, symmetrisch (SB)
- ca. 2 x 15.000 lfm Verkabelung (Kabel N2XH-J)
- ca. 2 x 1.600 lfm Kabelrinne
- 2 x 5 Leuchtdichtemessgeräte

A.2.2.2.4 Prozesse

Die zu berücksichtigenden Prozesse sind identisch mit den Prozessen der Einfahrtsbeleuchtung (Tabelle A.2.9). Es wird auf die dortigen Ausführungen verwiesen.⁸¹⁴

Tabelle A.2.9: Relevante Prozesse für das Modul „Innenbeleuchtung“

Herstellung		Nutzung							Verwertung
Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Modernisierung	Revitalisierung
X	X	X	X	X	X	X	X	(X)	-

⁸¹³ vgl. ASFINAG (2012)A, S. 41 bzw. S. 50 f.

⁸¹⁴ siehe Abs. A.2.2.1.4 – Prozesse Einfahrtsbeleuchtung

A.2.2.2.5 Leistungen

Die Leistungen, die zur Herstellung und dem Betrieb der Innenbeleuchtung anfallen, sind in großen Teilen deckungsgleich mit den Leistungen für die Einfahrtsbeleuchtung. An dieser Stelle werden deshalb nur die Leistungen angeführt, die abweichend zur Einfahrtsbeleuchtung anfallen. Für die anderen Leistungen sei auf Abs. A.2.2.1.5 verwiesen.

Versorgung:

Zur Erzielung der geforderten Leuchtdichte ist die Innenbeleuchtung über den gesamten Tag mit ausreichend Energie zu versorgen. Während der Nachtstunden kann eine Absenkung der erforderlichen Leuchtdichte, abhängig von Tageszeit und Verkehrsaufkommen, mit Hilfe der Stufenschaltung vorgenommen werden.⁸¹⁵ Eine vollständige Abschaltung ist dabei allerdings nicht vorgesehen.

Wartung:

Die Leuchtmittel der Innenbeleuchtung werden aus wirtschaftlichen Gründen vor Ablauf der eigentlichen Lebensdauer vollständig ausgetauscht. Zeitgleich wird eine Innenreinigung der Leuchten (Abdeckglas, Spiegel) vorgenommen.

In größeren Wartungszyklen ist des Weiteren ein vollständiger Tausch aller Vorschaltgeräte vorzunehmen. Zur Ausnutzung von Synergieeffekten hat dies zusammen mit dem Leuchtmitteltausch zu erfolgen.

In regelmäßigen Abständen ist die Beleuchtungsanlage zu kalibrieren. Dazu sind Abweichungen im tatsächlichen Leuchtdichteverlauf durch Vor-Ort-Messungen aufzunehmen und durch Kalibrierung der Steuerungseinheiten zu beheben.

A.2.2.2.6 Kosten

Die Kosten für die einzelnen Teilleistungen werden auf Basis realer Werte, in der Literatur veröffentlichter Größen, normativer Vorgaben bzw. durch Abschätzungen in Abs. A.3.4 eigenständig kalkuliert. Es werden beide Tunnelröhren in die Berechnungen einbezogen.

Planung:

Die Bestimmung der Planungskosten erfolgt in Anlehnung an die deutsche Honorarordnung (HOAI) – Fachgebiete Objektplanung Ingenieurbauwerke (§ 44) und Technische Ausstattung (§ 56).⁸¹⁶ Für die Verwaltungskosten werden Personalkosten abgeschätzt (Abs. A.3.4.1).⁸¹⁷

Planung und Verwaltung:	186.000,00 €
-------------------------	--------------

Umsetzung:

Die Kosten für den Einbau der Innenbeleuchtung werden eigenständig kalkuliert. Dazu wurden aus verschiedenen Ausschreibungsunterlagen Einheitspreise erhoben, auf den Bezugszeitpunkt 2014 umgerechnet und Mittelwerte gebildet (Abs. A.3.4.2).

Umsetzung:	429.200,00 €
------------	--------------

⁸¹⁵ vgl. FSV (2014)A, S. 18

⁸¹⁶ vgl. HOAI (2013), § 44 bzw. § 56

Für die anrechenbaren Kosten zur Bestimmung der Planungskosten wird auf die Umsetzungskosten zurückgegriffen. Dabei wird ein pauschaler Abschlag einbezogen, um berücksichtigen zu können, dass es sich hier nur um Teilleistungen für die Gesamtplanung handelt.

⁸¹⁷ In den Verwaltungskosten ist ein Zuschlag für die Gemeinkosten in Höhe von 20 % berücksichtigt. vgl. BMV (2001), S. 45; BMVBS (2013)B, S. 65

Versorgung:

Die Kosten für den Prozess Versorgung beziehen ausschließlich die Kosten für die Energieversorgung ein. Dazu sind die tatsächlichen, jährlichen Betriebsstunden der einzelnen Leuchten, deren jeweilige Leistungsaufnahme und der aktuelle Energiepreis zu den Kosten für Energie zusammenzuführen.

Eine verwertbare Erfassung der jährlichen Betriebsstunden von Innenbeleuchtungen liegt bislang nicht vor. Zur Bestimmung der Brenndauern wird deshalb davon ausgegangen, dass während der Tagesstunden die Innenbeleuchtung unter Volllast betrieben wird. Für die Nachtstunden wird auf die in RVS 09.02.41 vorgegebenen Betriebsreduktionsfaktoren sowie die zugehörigen Zeiträume zurückgegriffen (Tabelle A.2.8).⁸¹⁸

Die Leistungsaufnahme einer einzelnen Leuchte setzt sich aus dem Energiebedarf der Leuchtmittel und dem dazugehörigen Vorschaltgerät zusammen. Die Leuchten sind dabei mit Verlustarmen Vorschaltgeräten (VVG) ausgestattet.⁸¹⁹ Erweiternd wird der Energiebedarf für die Sensorik einbezogen.

Der Energiepreis wird mit 11 €Cent/kWh angesetzt (Abs. A.3.4.3).⁸²⁰

Energieversorgung:	28.800,00 €
--------------------	-------------

Reinigung:

Die Kosten für die Reinigung der Leuchten werden über den Aufwand und die daraus resultierenden Personal- und Gerätekosten abgeschätzt (Abs. A.3.4.4). Die Sensorik wird während der Inspektion und den Wartungsarbeiten gereinigt, so dass an dieser Stelle keine weiteren Kosten berücksichtigt werden.

Reinigung:	400,00 €
------------	----------

Inspektion:

Die Kosten für die Inspektion werden durch Abschätzung des Leistungsaufwandes für die einzelnen Teilleistungen bestimmt. Dabei wird zwischen den Kosten für die jährlich stattfindenden Inspektionen (Kontrolle) (Abs. A.3.4.5) und den zusätzlichen Kosten für die Prüfungen unterschieden (Abs. A.3.4.6).

Inspektion – Kontrolle (jährlich):	2.000,00 €
Inspektion – Zusätzliche Prüfung (alle 3 Jahre):	2.300,00 €

Wartung:

Die Kosten für die Wartung werden entsprechend dem zeitlichen Anfall der Leistungen getrennt für die Kalibrierung der Leuchtdichte (Abs. A.3.4.7), für den Leuchtmittel-tausch (Abs. A.3.4.8) sowie alternativ für den Leuchtmittel- und Vorschaltgerätetausch (Abs. A.3.4.9) berücksichtigt. Die Abschätzung erfolgt über zeitliche Aufwendungen sowie den Kosten für Geräte und Material.

Wartung – Kalibrierung Leuchtdichte:	1.100,00 €
Wartung – Leuchtmittel-tausch:	16.300,00 €
Wartung – Leuchtmittel- und VG-Tausch:	22.600,00 €

⁸¹⁸ vgl. FSV (2014)A, S. 18

⁸¹⁹ Der Leistungsbedarf von Leuchtmitteln und Vorschaltgeräten ist den technischen Datenblättern der Leuchtenhersteller zu entnehmen.

⁸²⁰ vgl. <http://oesterreichsenergie.at/daten-fakten/statistik/Strompreis.html> (abgerufen am 23.10.2014); http://www.statistik.at/web_de/statistiken/preise/energiepreise/074081.html (abgerufen am 23.10.2014)

Instandsetzung:

Für die Instandsetzungsarbeiten wird der Ausfall von Leuchtmitteln, Leuchten sowie sonstige Reparaturarbeiten berücksichtigt. Die daraus resultierenden Kosten werden über den Personalaufwand, die Gerätekosten sowie Materialkosten für die Austausch-elemente bestimmt. Dabei wird für die Ausfallrate der Leuchten und die sonstigen Re-paraturaufwendungen eine jährliche Steigerung bis zur Modulerneuerung angesetzt (Abs. A.3.4.10 und Abs. A.3.4.11).

Instandsetzung – sonstige Reparaturarbeiten:	1.200,00 €
Instandsetzung – Leuchten und Leuchtmittel:	1.300,00 €

Erneuerung:

Die geplante Nutzungsdauer der Beleuchtungsanlage wird mit 20 Jahren, die der Sen-sorik mit 15 Jahren angesetzt.⁸²¹ Danach erfolgt ein vollständiger Austausch der Be-leuchtungsanlage bzw. Sensorik. Die Leistungen der Erneuerung erfassen dabei den Rückbau der bestehenden sowie die Planung und den Einbau der neuen Anlage. Zu-sätzlich werden die Verwaltungskosten über einen Stundenaufwand abgeschätzt (Abs. A.3.4.12 und Abs. A.3.4.13).

Erneuerung – Sensorik:	44.600,00 €
Erneuerung – Leuchten:	526.400,00 €

A.2.2.2.7 Zeitliche Parameter

Planung & Umsetzung:

Der Anfallszeitpunkt für die Kosten der Planung und Umsetzung wird per Definition auf den Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung (Ende Herstellungs-phase – Beginn Nutzungsphase) gelegt.

Versorgung:

Die Kosten für die Energieversorgung der Beleuchtung sind als jährliche Kosten zu be-rücksichtigen.

Versorgung:	1x jährlich
-------------	-------------

Reinigung:

Die Reinigung der Leuchten erfolgt einmal pro Jahr. Um Synergieeffekte nutzen zu können, hat dies zeitgleich mit anderen Reinigungsarbeiten im Tunnel zu erfolgen.

Reinigung:	1x jährlich
------------	-------------

Inspektion:

Die Häufigkeit der unterschiedlichen Inspektionsmaßnahmen (Kontrolle bzw. Prüfung) ist durch die Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegeben.⁸²²

Inspektion – Kontrolle:	1 x jährlich
Inspektion – Prüfung:	alle 3 Jahre

⁸²¹ vgl. FSV (2014)c, Anhang 1

Die durchschnittliche Lebensdauer wird an dieser Stelle der geplanten Nutzungsdauer gleichgesetzt.

⁸²² vgl. FSV (2014)c, Anhang 2

Wartung:

In der Einfahrts- und Innenbeleuchtung sind identische Leuchtmittel verbaut. Durch die höhere jährliche Betriebsdauer gegenüber der Einfahrtszone, werden die Leuchtmittel der gesamten Innenbeleuchtung aus Sicherheitsgründen in einem reduzierten Zyklus von drei Jahren getauscht.⁸²³

Zusätzlich bedingt die angenommene, durchschnittliche Betriebsdauer von 8.760 h – bei einer Lebensdauer der Vorschaltgeräte von ca. 100.000 h – einen Austausch der Vorschaltgeräte in einem Zyklus von etwa elf Jahren. Zur Ausnutzung von Synergieeffekten erfolgt dies im Zuge des Leuchtmitteltausches, so dass die beiden Zyklen aufeinander abgestimmt werden müssen. Der Austausch ist während des Lebenszyklus der Leuchten (20 Jahre) dabei nur einmal (nach neun Jahren) einzuplanen.

Die unter Wartung zusammengefassten Leistungen zur Kalibrierung der Leuchtdichte haben jährlich zu erfolgen.

Wartung – Kalibrierung:	1 x jährlich
Wartung – Leuchtmittel:	alle 3 Jahre
Wartung – Leuchtmittel + Vorschaltgeräte:	nach 9 Jahren

Instandsetzung:

Die Reparaturarbeiten an der Beleuchtungsanlage sowie der Austausch von defekten Leuchten bzw. Leuchtmitteln werden als jährlich anfallende Kosten zusammengefasst.

Instandsetzung – Leuchten & Leuchtmittel:	1 x jährlich
Instandsetzung – Reparaturarbeiten:	1 x jährlich

Erneuerung:

Ausgehend von den in der Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegebenen, durchschnittlichen Lebensdauern, erfolgt eine Erneuerung der Leuchten in einem Zyklus von 20 Jahren. Die Sensorik wird nach 15 Jahre erneuert.⁸²⁴

Erneuerung – Sensorik:	alle 15 Jahre
Erneuerung – Leuchten:	alle 20 Jahre

⁸²³ vgl. FGSV (2011), S. 33 oder auch HÖHNE (2002), S. 137

⁸²⁴ vgl. FSV (2014)c, S. 10

A.2.2.2.8 Parameterstudie zur Eingrenzung der Schnittstellen

Eine allgemeingültigen Bestimmung der Einflussgrößen und Schnittstellen der einzelnen Prozesse bzw. Leistungen, der zugehörigen Kosten sowie der Zeitlichen Parametern erfolgt auf Basis der technischen Vorschriften und Richtlinien (RVS 09.02.22, PLaPB – Tunnel-Beleuchtung, CIE 88, CIE 189, DIN 67524-1, RABT 2006).⁸²⁵ Im weiteren Schritt wird mit Hilfe der vorliegenden Parameter und der aktuellen Ausgestaltung eine Eingrenzung der veränderlichen Eingangsgrößen vorgenommen. Eine Einbeziehung praxisbezogener Daten kann (in Ermangelung aussagekräftiger Werte) an dieser Stelle nicht erfolgen.

Die für die Innenstrecke erforderliche Leuchtdichte (L_{fi}) wird ausgehend von Formel (A.2.45) bestimmt. Dabei wesentlich sind gemäß RVS 09.02.41 folgende Einflussgrößen.⁸²⁶

- Verkehrsstärke (bzw. Gefährdungsklasse)
- Haltesichtweite (bzw. zul. Höchstgeschwindigkeit)
- Verkehrszusammensetzung

Weitere Einflussgrößen zur Dimensionierung der Innenbeleuchtung umfassen die Tunnellänge, die Querschnittsform und die Querschnittsabmessungen des Bauwerkes sowie die Bauart der verwendeten Leuchten und deren Anordnung im Tunnelquerschnitt (Abbildung A.2.26). Zusätzlich werden die Aufwendungen für Reinigung, Prüfung, Wartung und Instandsetzung von der Art und Anzahl der Leuchten sowie deren Zugänglichkeit bestimmt. Die Lebensdauer der Leuchten und der Leuchtmittel beeinflussen die Häufigkeit der Wartungs-, Instandsetzungs- bzw. Erneuerungsarbeiten.

Die Vielzahl an Schnittstellen bedingt eine Strukturierung in übergeordnete Themenbereiche. Die Art der Schnittstellen ermöglicht dabei eine Einteilung in die Bereiche: Beleuchtung, Verkehr und Bauwerk. Die weitere Zusammenstellung der Schnittstellen erfolgt in Abbildung A.2.34.

⁸²⁵ vgl. FSV (2014)A; ASFINAG (2012)A; CIE 88 (2004); CIE 189 (2010); DIN 67524-1 (2008); FGSV (2006)

⁸²⁶ vgl. FSV (2014)A, S. 17

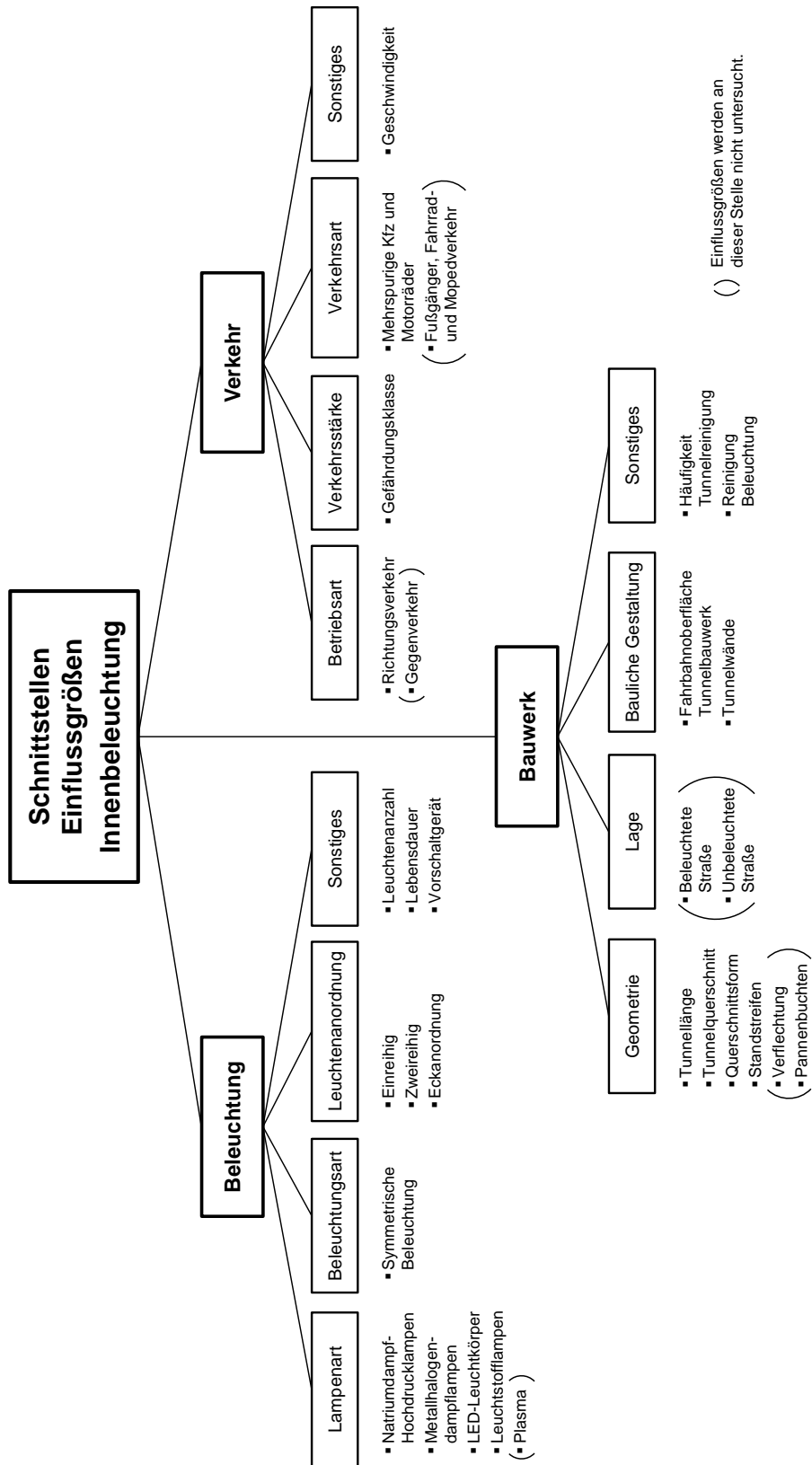


Abbildung A.2.34: Schnittstellen und Einflussgrößen der Innenbeleuchtung⁸²⁷

⁸²⁷ in Anlehnung an SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 251

Zur Bewertung der Schnittstellen und zur Bestimmung der Relevanz liegt bislang keine ausreichende Datengrundlage vor. Zur Eingrenzung der Schnittstellen werden, analog dem Vorgehen der Einfahrtsbeleuchtung (Abs. A.2.2.1.8), die maßgeblichen Einflussgrößen mit Hilfe einer Parameterstudie bestimmt. Dabei bleiben Einflussgrößen, die im Vorfeld bereits auszuschließen sind (z. B. Fußgängerverkehr im Straßentunnel), in der Bewertung unberücksichtigt. Zur Bestimmung der Relevanz der Einflussgrößen wird für die Parameterstudie auf die Simulationssoftware „ReluxTunnel“ zurückgegriffen.⁸²⁸ Ausgangspunkt ist der für die Einfahrtsbeleuchtung bereits definiert Referenz tunnel (Abs. A.2.2.1.8 – Abbildung A.2.29 und Tabelle A.2.6).

Dimensionierung der Innenbeleuchtung für den Referenz tunnel

Die Dimensionierung der Innenbeleuchtung erfolgt mit Hilfe der Simulationssoftware „ReluxTunnel“. Ziel ist es nicht, eine vollständige, detailgetreue Planung der Beleuchtungsanlage auszuarbeiten. Vielmehr soll an dieser Stelle eine Abschätzung der Einflüsse verschiedener Parameter ermöglicht werden. Aus diesem Grund wird die vom Programm eigenständig ermittelte erforderliche Systemleistung als Vergleichsmaßstab herangezogen. Auf eine exakte Ausarbeitung wird verzichtet. Allerdings erfolgt eine Prüfung der Berechnungsergebnisse auf Basis der wesentlichen Planungskriterien gemäß RVS 09.02.41 bzw. CIE 88:

- Flimmerfrequenz FF (RVS 09.02.41, Abs. 2.2)

$$FF = v / (3,6 \cdot y) < 4,0 \text{ Hz} \quad (\text{A.2.46})$$

- v = maximal zulässige Fahrgeschwindigkeit
- y = mittlere Leuchtdichte des Mess- und Berechnungsfeldes

- Gesamtgleichmäßigkeit U_o (RVS 09.02.41, Abs. 3.2.2)

$$U_o = L_{min} / L_m \geq 0,40 \quad (\text{A.2.47})$$

- L_{min} = minimale Leuchtdichte des Mess- und Berechnungsfeldes
- L_m = mittlere Leuchtdichte des Mess- und Berechnungsfeldes

- Längsgleichmäßigkeit U_i (RVS 09.02.41, Abs. 3.2.2)

$$U_i = L_{min} / L_{max} \geq 0,60 \quad (\text{A.2.48})$$

- L_{max} = maximale Leuchtdichte des Mess- und Berechnungsfeldes

- Blendungsbegrenzung/Schwellenwerterhöhung TI (RVS 09.02.41, Abs. 3.2.3)

$$TI = 95 \cdot \frac{L_s}{L_{fx}}^{1,05} < 15 \% \quad \text{für } L_{fx} > 5 \text{ cd/m}^2 \quad (\text{A.2.49})$$

$$TI = 65 \cdot \frac{L_s}{L_{fx}}^{0,8} < 15 \% \quad \text{für } L_{fx} \leq 5 \text{ cd/m}^2 \quad (\text{A.2.50})$$

- L_s = Schleierleuchtdichte
- L_{fx} = Fahrbahnleuchtdichte des entsprechenden Tunnelabschnittes

⁸²⁸ Die Simulationssoftware „ReluxTunnel“ wurde bereits in Abs. A.2.2.1.8 vorgestellt.

- Kontrastgütekoeffizient q_c (RVS 09.02.41, Abs. 3.3.1)

$$q_c = \frac{L_{fe}}{E_{v+}} \leq 0,5 \text{ cd/m}^2lx \quad \text{symmetrische Beleuchtung} \quad (\text{A.2.51})$$

L_{fe} = Fahrbahnleuchtdichte
 E_{v+} = mittlere Vertikalbeleuchtungsstärke

Die Tunnelwände sind mit mindestens 50 % der Fahrbahnleuchtdichte auszuleuchten. Gleichzeitig ist eine Längsgleichmäßigkeit von mindestens 40 % einzuhalten.⁸²⁹

Unter Verwendung von Auszügen aus dem Ergebnisplot für den Referenztunnel wird die Einhaltung der geforderten Grenzwerte nachgewiesen:⁸³⁰

Nachweis Flimmerfrequenz:

Leuchtenreihe: Band 1.1	
Anzahl Leuchten: 46	Systemleistung (gesamt): 16.2kW (1.00 km)
Grundposition: x=2.00m y=3.75m, z=6.50m	Konstanter Abstand: 21.79m
Leuchtdrehung: z=0.0° C0=0.0° C90=0.0°	Flimmerfrequenz (v=100 km/h): 1.3 Hz

Abbildung A.2.35: Systemleistung Innenbeleuchtung (Referenztunnel)

Nachweis Gleichmäßigkeit:

Die Nachweise für Schwellenwerterhöhung TI und Kontrastgütekoeffizient q_c erfolgen eigenständig. Die hier angeführten Werte sind bezogen auf die Leuchtdichte und den zugehörigen Nachweisen und besitzen keine Relevanz für TI bzw. q_c .

Beobachterposition 1		: x = -44.1, y = 1.88, z = 1.5 (dx = 61.19)
Mittlere Leuchtdichte	L_m	: 3.37 cd/m ²
Minimale Leuchtdichte	L_{min}	: 2.16 cd/m ²
Gesamtgleichmäßigkeit U_o	L_{min}/L_m	: 0.64
Längsgleichmäßigkeit U_l	L_{lmin}/L_{lmax}	: 0.78
Schwellenwerterhöhung	TI	: 2.16 %
Mittlerer Kontrastgütekoeffizient	$L_r/E_v (av)$: 0.806

Abbildung A.2.36: Berechnungsergebnisse Leuchtdichte (Referenztunnel)

Nachweis Schwellenerhöhung TI:

Beobachterposition 1		: x = 2.15, y = 1.88, z = 0 (dx = 0.00)
Schwellenwerterhöhung	TI	: 2.16 %

Abbildung A.2.37: Berechnungsergebnisse Schwellenwerterhöhung TI (Referenztunnel)

Nachweis Kontrastgütekoeffizient q_c :

Beobachterposition 1		: x = -60, y = 1.88, z = 1.5
Mittlerer Kontrastgütekoeffizient	$L_r/E_v (av)$: 0.175
Minimaler Kontrastgütekoeffizient	$L_r/E_v (min)$: 0.077
qc: Der rückwärts gerichtete Reflexionsgrad der Straße wurde berechnet.		

Abbildung A.2.38: Berechnungsergebnisse Kontrastgütekoeffizient q_c (Referenztunnel)

⁸²⁹ vgl. FSV (2014)A, S. 18

⁸³⁰ Die Ergebnisse der einzelnen Rechenläufe sind dem beiliegenden Datenträger zu entnehmen.

Nachweis Leuchtdichteverhältnisse Tunnelwände:

Beobachterposition 1		: $x = -44.1, y = 1.88, z = 1.5$ ($dx = 61.19$)
Mittlere Leuchtdichte	L_m	: 4.42 cd/m^2
Minimale Leuchtdichte	L_{min}	: 2.83 cd/m^2
Gesamtgleichmäßigkeit U_0	L_{min}/L_m	: 0.64
Längsgleichmäßigkeit U_l	L_{min}/L_{lmax}	: 0.52 (1.00m)

Abbildung A.2.39: Berechnungsergebnisse Wandleuchtdichte (Referenztunnel)

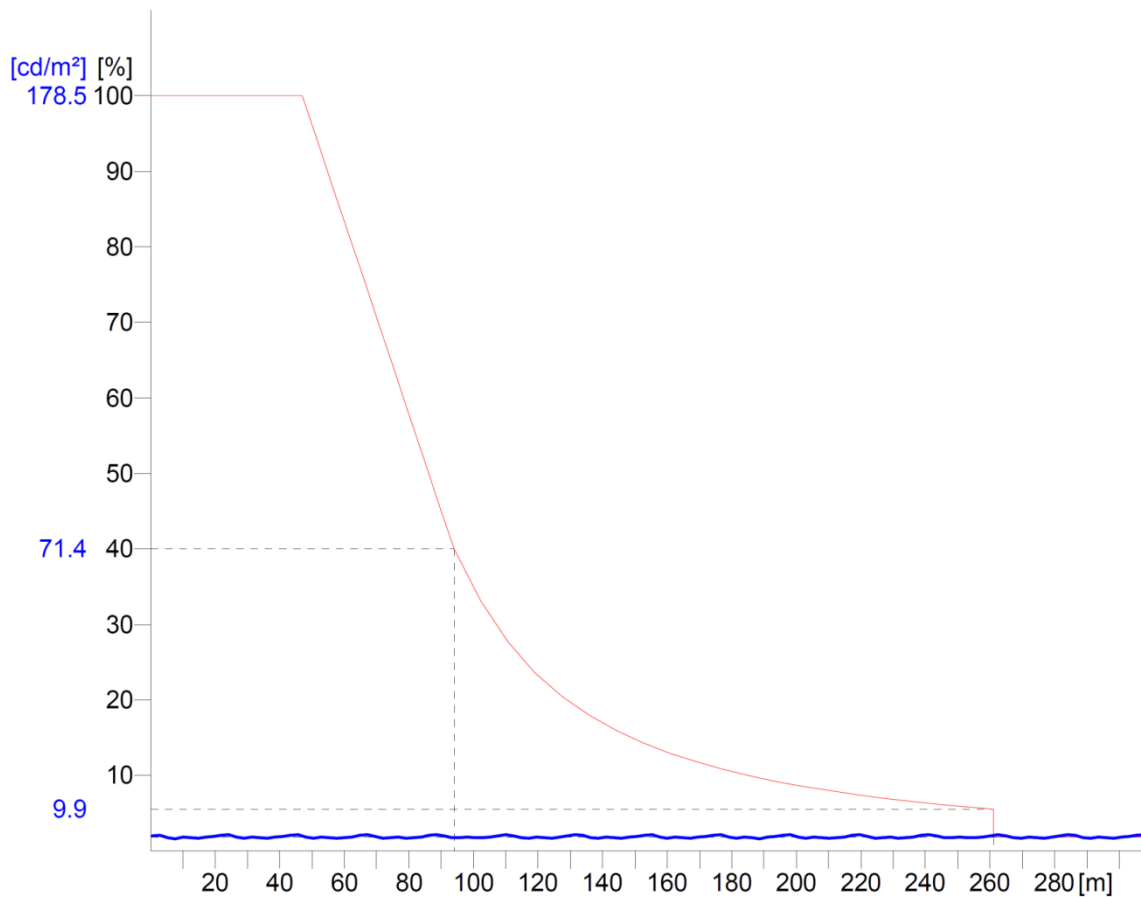


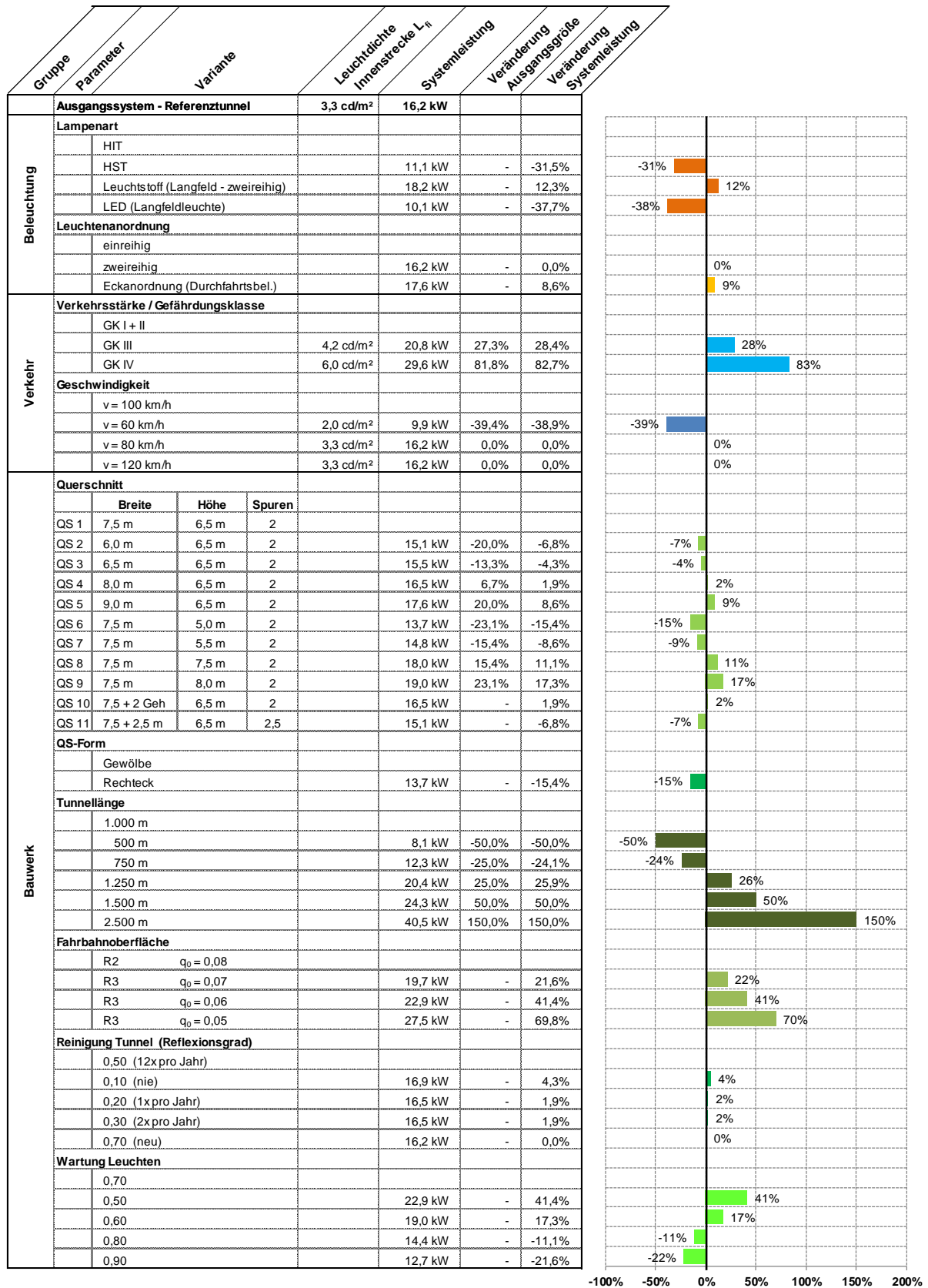
Abbildung A.2.40: Verlauf der Leuchtdichte Innenbeleuchtung – 100 % (Referenztunnel)

Als Ausgangsbasis für die Parameterstudie wurde für die Innenstrecke eine Beleuchtungsanlage mit einer Systemleistung vom 16,2 kW ermittelt (Abbildung A.2.35). Die einzelnen Prüfkriterien wurden dabei eingehalten (Abbildung A.2.36 – Abbildung A.2.39). Der Verlauf der Leuchtdichte kann für die an dieser Stelle vernachlässigte Genauigkeit als ausreichend angesehen werden (Abbildung A.2.40).

Ergebnisse der einzelnen Varianten

Die Ergebnisse der einzelnen Rechenläufe sind nachfolgend in Tabelle A.2.10 zusammengefasst. Für die Auswertung wurde die jeweils berechnete Systemleistung dem Ergebnis des Referenztunnels gegenübergestellt und die Veränderung bestimmt.

Tabelle A.2.10: Ergebnisse der Parameterstudie für die Schnittstellen der Innenbeleuchtung



Festlegung der wesentlichen Schnittstellen

Die Ergebnisse der Parameterstudie lassen fünf wesentliche Einflussgrößen erkennen.

Die ausgeprägteste Abhängigkeit der Systemleistung besteht zur erforderlichen **Leuchtdichte** L_{fi} . Diese wird wesentlich durch die Erkennbarkeit von Gefahrensituationen (mit Haltesichtweite und Geschwindigkeit) und das Gefahrenpotential (Verkehrsstärke) bestimmt. Hier ist ein linearer Zusammenhang zu erkennen. Dass die Geschwindigkeit lediglich unterhalb von 80 km/h einen Einfluss besitzt, ist darauf zurückzuführen, dass die Bestimmung der erforderlichen Leuchtdichte entsprechend den Vorgaben der RVS 09.02.41 erfolgt. Hier sind keine Erhöhungen für Geschwindigkeiten über 80 km/h vorgesehen.⁸³¹ Andere Regelungen, z. B. DIN 67524-1 oder RABT 2006, beziehen ein größeres Geschwindigkeitsspektrum über die Haltesichtweite bzw. über die Beleuchtungsklasse ein.⁸³²

Ein weiterer linearer Zusammenhang zeigt sich zwischen der Systemleistung und der **Tunnellänge**. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass bei sehr langen Tunneln (i. d. R. $L > 2500$ m) eine Reduzierung der erforderlichen Leuchtdichte vorzunehmen ist.⁸³³

Die **Geometrie** des Bauwerkes hat, sofern die Unterschiede verhältnismäßig gering ausfallen, kaum Einfluss auf die erforderliche Systemleistung. Sollte jedoch eine weitere Fahrspur oder eine stark abweichende Lichtpunkthöhe vorgesehen werden, ist dies von Relevanz. Entsprechende Einflüsse können aus der Veränderung der Querschnittsform abgeleitet werden. Beispielsweise kann bei Rechteckquerschnitten, gegenüber Gewölbequerschnitten ohne Zwischendecke, die Beleuchtung – relativ zur Fahrbahn – in einer geringeren Höhe angebracht werden.

Wie bereits bei der Einfahrtsbeleuchtung, tragen die **Reflexionseigenschaften** der Fahrbahn und Tunnelwände maßgeblich zur Bemessung der Systemleistung bei.

Über das vorab zu definierende Wartungskonzept, aus dem die **Wartungsfaktoren** bestimmt werden, wird die Lichtausbeute und damit die Systemleistung beeinflusst.

Die **Lampenart** trägt entscheidend zur Dimensionierung der Beleuchtungsanlage bei. Insbesondere LED-Leuchtmittel können durch den reduzierten Energiebedarf zu einer Verringerung der Systemleistung führen.

In Bezug auf die Wechselwirkung mit anderen Modulen und deren Prozesse lassen die gewonnenen Erkenntnisse der Parameterstudie folgende Interdependenzen erkennen:

- Die Innenschale bzw. eine zusätzliche Beschichtung ermöglichen eine Reduzierung des Energiebedarfs zur Erzielung der notwendigen Fahrbahnleuchtdichte. Zusätzlich können durch die Prozesse Reinigung, Instandsetzung oder Erneuerung der Energiebedarf (Prozess Versorgung) oder auch die Systemgröße der Beleuchtung beeinflusst werden.
- Die Reflexionseigenschaften des Fahrbahnbelages nehmen Einfluss auf die Innenbeleuchtung. Die Wahl des Materials sowie die Ausgestaltung der Prozesse Reinigung, Instandsetzung oder Erneuerung für die Deckschicht sind darauf abzustimmen.

⁸³¹ vgl. FSV (2014)A, S. 17

⁸³² vgl. DIN 67524-1 (2008), S. 16 f.; FGSV (2006), S. 17 f.

⁸³³ vgl. FSV (2014)A, S. 17; DIN 67524-1 (2008), S. 16

Modulinterne Schnittstellen sind über die Art des Leuchtmittels, den Wartungsfaktor, den zugrundeliegenden Wartungsplan (Reinigung und Wartung) sowie die Systemleistung bzw. den Energiebedarf ersichtlich.

Neben den aus der Parameterstudie ermittelten Einflussgrößen, ist die Anzahl der Leuchten eine maßgebliche Größe für die Prozesse Reinigung, Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Erneuerung der Leuchten. Insbesondere die zeitlichen Aufwendungen für die jeweilige Leistung einer einzelnen Leuchte sind dabei von entscheidender Bedeutung.

Der Einfluss des Vorschaltgerätes ist, wie bereits bei der Einfahrtsbeleuchtung, aufzunehmen und über die Art des Vorschaltgerätes bzw. Treibers zu berücksichtigen. Zusätzlich ist die Lebensdauer der Leuchten, der Leuchtmittel und der weiteren Elemente von Relevanz. Hierüber wird die Häufigkeit von Leuchten- bzw. Leuchtmitteltausch geprägt.

Die Betriebsart (Gegen- oder Richtungsverkehrstunnel) ist ohne Einfluss, da bei einem üblichen Einbau der Innenbeleuchtung über die gesamte Tunnelstrecke (inkl. Einfahrtsstrecke) keine zusätzlichen Leuchten zu installieren und zu betreiben sind. Allerdings sind bei zwei getrennten Tunnelröhren, auch zwei Systeme zur Innenbeleuchtung vorzusehen, so dass hieraus doch ein wesentlicher Einfluss für den Betrieb erwächst.

A.2.2.2.9 Schnittstellen

Planung & Umsetzung:

Die Kosten für die Planung und den Einbau der Innenbeleuchtung werden durch die aufzubringende Leuchtdichte L_{fi} und damit durch die Anzahl der erforderlichen Leuchten bestimmt. Daraus ableiten lässt sich eine wesentliche Schnittstelle zur Tunnellänge.

Die erforderliche Leuchtdichte selbst ist abhängig von der Erkennbarkeit von Gefahrensituationen (mit Haltesichtweite und Geschwindigkeit), dem vorliegenden Gefahrenpotential (Verkehrsstärke) sowie den Reflexionseigenschaften von Fahrbahn und Tunnelwänden. Zusätzliche kostenbeeinflussende Größen stellen die Art der verwendeten Leuchten (HST, LED, Leuchtstoffröhren) sowie der durch Wartungspläne vorab festzulegenden Wartungsfaktoren dar (Instandhaltungsstrategie).

Versorgung:

Die durch die Energieversorgung erzeugten Kosten werden über den Energiebedarf und dem zu entrichtenden Energiepreis bestimmt. Der Energieverbrauch resultiert aus der erforderlichen Leuchtdichte, der Anzahl der Leuchten und deren jährliche Brenndauer sowie dem Energiebedarf der einzelnen Leuchte (inkl. Vorschaltgerät). Die maßgeblichen Parameter der Systemleistung – zusammengesetzt aus der Leuchtdichte, Anzahl der Leuchten und deren Leistung – sind auch wesentliche Größen für die Planung und Umsetzung und wurden dort bereits vorgestellt.

Der Energiepreis ist abhängig vom Energieversorger, der Marktlage, der Abnahmemenge sowie weiteren Faktoren, die hier nicht erhoben werden sollen. An dieser Stelle soll vom Energiepreis als eigenständige Größe ausgegangen werden.

Die USV-Anlage zur Sicherstellung eines zeitlich begrenzten Notfallbetriebs ist in seiner Auslegung abhängig vom Energiebedarf der Beleuchtungsanlage.

Reinigung:

Die Kosten für die Reinigung der Tunnelleuchten werden maßgeblich durch die Anzahl der Leuchten und daraus resultierend, durch den zeitlichen Aufwand bestimmt. Die im Wartungsplan vorgesehenen Reinigungsintervalle fakturieren die Reinigungskosten über die jährliche Häufigkeit (Instandhaltungsmanagement).

Inspektion:

Die Kosten der Inspektion sind geprägt durch den zeitlichen Umfang der einzelnen Leistungen. Art und Häufigkeit sind dabei durch gesetzliche, normative bzw. betreiber-spezifische Regelungen vorgegeben.

Wartung:

Die Kosten für den Leuchtmitteltausch werden durch den zeitlichen Aufwand für den Wechsel sowie das zu wechselnde Leuchtmittel selbst bestimmt. Die Anzahl und Lebensdauer der Leuchtmittel sind dabei entscheidende Faktoren für die Häufigkeit der Wartungsarbeiten, so dass auch hier die Einflussgrößen für die Systemleistung einzubeziehen sind.

Instandsetzung:

Die Ausfallrate von Leuchten und Leuchtmitteln als Qualitätsmerkmal und damit einhergehend die Anzahl der auszuwechselnden Leuchten, Leuchtmittel, Vorschaltgeräte sowie der dafür notwendige Zeitaufwand bestimmen im Wesentlichen die Instandsetzungskosten. Dabei fließt die vorgesehene Instandhaltungsstrategie mit ein.

Erneuerung:

Die Schnittstellen für die Kosten zur Erneuerung der Beleuchtungsanlage sind vergleichbar mit den Schnittstellen für die Planung und Umsetzung in der Herstellungsphase. Die Häufigkeit ist geprägt durch den Erneuerungszyklus und hängt von der Lebensdauer bzw. geplanten Nutzungsdauer der Leuchten und der Sensorik ab.

A.2.3 Baugruppe Lüftung

Die Tunnellüftung hat im Regelbetrieb eine sichere Nutzung des Bauwerkes durch Verkehrsteilnehmer und Betriebspersonal zu gewährleisten. Dazu sind die Forderungen zur Einhaltung von Grenzwerten gesundheitsgefährdender Gase (CO, NO_x) sowie der Sichttrübung für ausreichende Sichtverhältnisse zu erfüllen. Zusätzlich hat die Tunnellüftung im Brandfall, durch Verbesserung der Sichtverhältnisse (Entrauchung) und Reduktion der Hitzeentwicklung, die Selbstrettung der Tunnelnutzer zu unterstützen sowie geeignete Bedingungen für Einsatzkräfte zu schaffen.⁸³⁴

Die Lüftungsanlage ist dabei für beide Fälle (Regelbetrieb und Ereignisfall) zu dimensionieren. Die voranschreitende Entwicklung im Bereich der Motorentechnologie sowie Verschärfungen hinsichtlich der Abgas- und Feinstaubemission von Verbrennungsmotoren haben dazu geführt, dass in vielen Fällen der Brandfall zur Auslegung der Lüftungsanlage maßgeblich wird. Vielfach kann im Regelbetrieb sogar gänzlich auf eine mechanische Lüftung verzichtet werden. Dazu beigetragen hat auch die aus Sicherheitsgründen vermehrte Umsetzung von Richtungsverkehrstunneln, die eine natürliche Selbstlüftung durch die hervorgerufene Kolbenwirkung ermöglichen.⁸³⁵

Je nach projektspezifischen Randbedingungen (Tunnellänge, Verkehrsdichte, Betriebsart usw.) sind Tunnelbauwerke mit unterschiedlichen Lüftungssystemen auszustatten. Dabei werden folgende Systeme unterschieden:⁸³⁶

- Natürliche Lüftung
- Mechanische Längslüftung
- Halbquerlüftung
- Querlüftung
- Punktabsaugung

A.2.3.1 Modul Lüftungsanlage

A.2.3.1.1 Beschreibung

Im vorliegenden Projekt kommt das aktuell am häufigsten eingesetzte Lüftungssystem, in Form einer mechanischen Längslüftung mittels Strahlenventilatoren, zur Anwendung. Dabei wird mit Hilfe von Ventilatoren eine Längsströmung der Tunnelluft erzeugt, die einen Luftaustausch über die Portale ermöglicht. Die zur Überwindung der Strömungswiderstände (Gefälle, Einbauten, Wind usw.) erforderlichen Strahlventilatoren sind dabei möglichst über dem Fahrraum anzuordnen. Im Regelbetrieb erfolgt die Steuerung der Tunnellüftung kontinuierlich über verschiedene Messeinrichtungen, die über die gesamte Tunnellänge angeordnet sind. Es werden die Sichttrübung, die CO-Konzentration sowie die Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe von Sensoren erfasst und permanent den zulässigen Richtwerten (mit vorgegebenen Toleranzbereichen) gegenübergestellt. Für den Ereignisfall (Brand) werden zusätzliche Ausstattungselemente (Brandmeldekabel, Videodetektion usw.) zur schnellen Detektion und Lokalisierung herangezogen.⁸³⁷ Grundsätzlich ist das Lüftungssystem aber für beide Fälle (Betrieb und Brand) zu dimensionieren.

⁸³⁴ vgl. FSV (2014)B, S. 3; ASTRA (2008), S. 10; FGSV (2006), S. 20; SCHWARZ, ENGELHARDT (2012), S. 245

⁸³⁵ vgl. STURM, BACHER (2008), S. 50; RIESS, BRANDT (1999), S. 38 f.

⁸³⁶ vgl. FSV (2014)B, S. 6 f.

⁸³⁷ vgl. FSV (2014)B, S. 20 ff.; ASTRA (2008), S. 38 f.; FGSV (2006), S. 26

Für die Lüftungsanlage des Mustertunnels gelten folgende Grundparameter:

- mechanische Längslüftung mittels Strahlventilatoren
- paarweise Anordnung der Strahlventilatoren an der Tunneldecke
- Tunnellänge: 2.400 m
- Querschnittsfläche Tunnel: 52,50 m²
- Tunnelumfang: 27,80 m (inkl. Fahrbahn)
- Tunnelwand: glatter Sichtbeton
- Längsneigung: +2 % bzw. -2 %
- Höhenlage Portale: 1.000 m NHN
- Betriebsart: Richtungsverkehr
- Anzahl der Fahrspuren je Fahrtrichtung: 2
- zul. Höchstgeschwindigkeit: 100 km/h
- Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke: 14.000 Kfz/24h (Jahr 2014)
- Bemessungsrelevante Verkehrsdichte: 1.000 Kfz/h
- LKW-Anteil: 10 %
- Gefährdungsklasse II
- Umgebungsbedingungen Normalbetrieb: -20°C bis +40°C
- Umgebungsbedingungen Brandfall: +250°C (mindestens 90 Minuten)

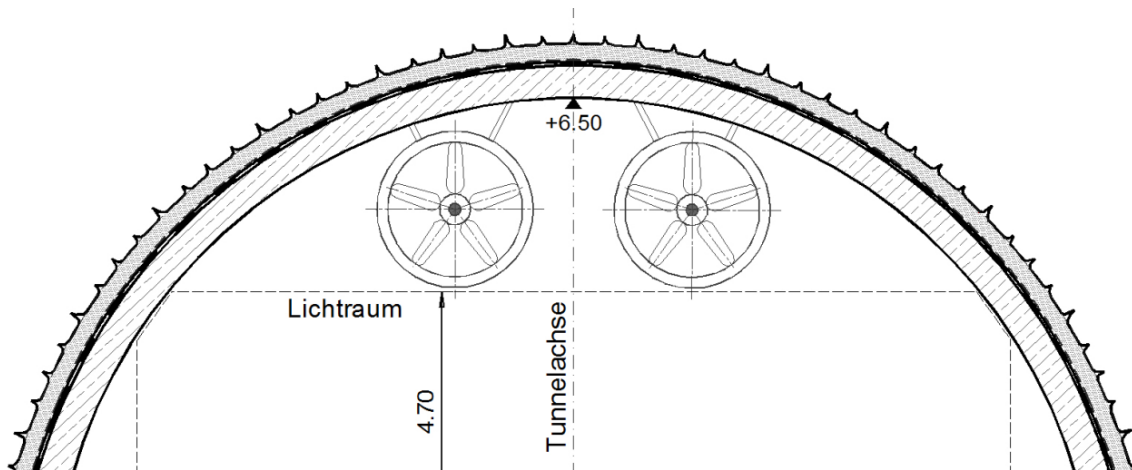


Abbildung A.2.41: Anordnung Strahlventilatoren im Tunnelquerschnitt

A.2.3.1.2 Definition und Abgrenzung des Moduls

Die technisch-funktionale Aufgabe der Tunnellüftung umfasst im Regelbetrieb die Gewährleistung ausreichender Sichtbedingungen sowie die Vermeidung gesundheitsgefährdender Luftverhältnisse durch Verdünnung und Abführung von Schadstoffen. Im Brandfall hat die Tunnellüftung eine Selbstrettung der Tunnelnutzer zu unterstützen und den Einsatz von Rettungskräften zu ermöglichen.

Funktionale Unabhängigkeit

Die zu erbringenden Aufgaben werden, sowohl im Regelbetrieb als auch im Brandfall, mit den verwendeten Bauelementen und den zugehörigen Sensoren vollständig durch das Modul abgedeckt.⁸³⁸ Die Gewährleistung ausreichender Sichtverhältnisse steht dabei zwar im Kontext zur Tunnelbeleuchtung, allerdings werden mit der Lüftung andere Ziele (Luftverhältnisse anstelle Helligkeit) angestrebt, so dass hier keine Überschneidung vorliegt. Die Abgrenzung zu anderen Modulen sowie die eigenständige Leistungserbringung stellen die funktionale Unabhängigkeit sicher. Davon ausgenommen sind die Stromversorgung sowie die softwaregestützte Steuerung, die jeweils durch eigene Module extern erbracht werden.

Physische Unabhängigkeit

Bei einer Längslüftung werden die Ventilatoren mit Hilfe von Befestigungskonsolen und Schwerlastankern reversibel an der Tunneldecke befestigt.⁸³⁹ Eine entsprechende Austauschbarkeit ist auch für die zugehörigen Sensoren einzuhalten. Kabel sind über zugängliche Kabelkanäle, Versorgungskanäle bzw. durch vorab verlegte Kabelschutzrohre zu führen.⁸⁴⁰ Eine gegenständliche Trennung, auch nur einzelner Elemente der Lüftungsanlage, wird durch diese Vorgaben gewährleistet und so das Kriterium der physischen Unabhängigkeit erfüllt.

Integrität

Abgesehen von der Stromversorgung und der softwaregestützten Steuerung umfasst das Modul alle für die beiden Betriebsfälle (Regel- und Brandfall) erforderlichen Elemente. Eine Aggregation zu einem übergeordneten Untersuchungsrahmen ist durch die Eigenständigkeit gegeben.

A.2.3.1.3 Elemente

Die Tunnellüftung umfasst nach ASTRA „(...) *sämtliche Einrichtungen zur Aufrechterhaltung einer ausreichenden Luftqualität im Tunnelinnenraum im Normalbetrieb und in Ausnahmesituationen wie Störung des Verkehrsflusses oder Notfälle. Zum System der Tunnellüftung gehören insbesondere (...) die Ventilatoren, die Mess- und Steuereinrichtungen*“.⁸⁴¹

Im vorliegenden Fall ist der Tunnel mit einer Längslüftungsanlage und mechanischen Strahlventilatoren ausgestattet. Die Messung und Steuerung der Ventilatoren erfolgt über kombinierte Messgeräte zur Bestimmung der CO-Konzentration und Sichttrübe sowie über Ultraschall-Laufzeit-Differenz-Messgeräte zur Luftgeschwindigkeitsmessung.

⁸³⁸ Beispielsweise ist „(...) *der Strahlventilator als vollbetriebsfähiger Anlagenteil zu liefern* (...)“.
ASFINAG (2013), S. 18

⁸³⁹ vgl. ASFINAG (2013), S. 23

⁸⁴⁰ Vergleichbar mit der Verkabelung für die Tunnelbeleuchtung.
vgl. ASFINAG (2012)A, S. 53 f.

⁸⁴¹ ASTRA (2008), S. 9

Das Modul „Lüftungsanlage“ umfasst im Wesentlichen folgende Elemente:

- 22 Strahlventilatoren
 - Nordröhre 12 Stück
 - Südröhre: 10 Stück
 - Nenndurchmesser: 1.000 mm
 - Volumenstrom: 20,9 m³/s
 - Ausblasgeschwindigkeit 31,8 m/s
 - Stand Schub 770 N
 - Schubrichtung umkehrbar
 - max. elektr. Leistungsaufnahme 16,4 kW
- Verkabelung ca. 13.000 lfm
- Sensorik / Messgeräte
 - Kohlenmonoxid CO + Sichttrübe 2 x 4 Stück
 - Luftgeschwindigkeit 2 x 3 Stück
- Sonstiges:
 - Je Strahlventilator: Reversierbarer Betrieb, Schalldämpfer an beiden Seiten, Klemmkasten, Aufhängekonstruktion, Fallsicherung, Abrissüberwachung sowie Verkabelung bis zum Schaltschrank in der Betriebszentrale.

A.2.3.1.4 Prozesse

Die Herstellungsphase umfasst die Prozesse der Planung und Umsetzung, wobei eine Auslegung sowohl für den Regelbetrieb als auch für den Brandfall zu erfolgen hat. Durch die Entwicklung emissionsarmer Fahrzeuge ist im Regelbetrieb eine mechanische Lüftung nicht mehr erforderlich. Das bedeutet, dass während der Nutzungsphase nur noch eine Energieversorgung im Ereignisfall (dazu zählen auch Fehlalarme) bzw. zur Systemprüfung notwendig wird. Allerdings macht die sicherheitstechnische Relevanz der Tunnellüftung eine dauerhafte Funktionsfähigkeit der Lüftungsanlage notwendig. Diese ist durch regelmäßige Reinigungs-, Inspektions- und Wartungsarbeiten sowohl an den Lüftern als auch an der Sensorik sicherzustellen. Durch Instandsetzungsmaßnahmen sind Schäden oder eine fehlende Funktionsfähigkeit umgehend zu beheben. Die gegenüber der Baukonstruktion deutlich geringere Lebensdauer von ca. 20 Jahren macht eine regelmäßige Erneuerung der gesamten Lüftungsanlage erforderlich.⁸⁴² Dies umfasst einen Ausbau des Moduls bzw. großer Teile davon sowie den Einbau neuer, gleichwertiger Komponenten. Die Einbeziehung eines Austausches mit technisch weiterentwickelten Komponenten (Modernisierung) kann aufgrund der kaum prognostizierbaren zukünftigen Entwicklungen nicht erfolgen. Zudem bleibt in diesem Beispiel die Verwertungsphase, mit den dabei anfallenden Prozessen, ebenso außen vor (Tabelle A.2.11).

Tabelle A.2.11: Relevante Prozesse für das Modul „Lüftungsanlage“

Herstellung		Nutzung							Verwertung
Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Modernisierung	Revitalisierung
X	X	X	X	X	X	X	X	(X)	-

⁸⁴² Lebensdauer gemäß FSV (2014)c, S. 10

A.2.3.1.5 Leistungen

Planung:

Die Planung beinhaltet die Dimensionierung der Lüftungsanlage für beide Betriebsfälle, die Erstellung der notwendigen Planungsunterlagen sowie die Dokumentation. Zusätzlich sind die Aufwendungen für die bauherrninterne Verwaltung, die Prüfung der Planung sowie die Bauüberwachung und das Projektmanagement einzubeziehen.

Umsetzung:

Die Umsetzung umfasst die Lieferung, die Montage und den Einbau der vollständigen Lüftungsanlage, die Einstellung und Trimmung der Steuerung sowie die Durchführung von Messungen zur Einhaltung der geforderten Funktionalität.

Versorgung:

Die Energieversorgung setzt sich aus dem Energieverbrauch der Strahlventilatoren sowie der verbauten Sensorik zusammen. Im Regelbetrieb ist dabei keine mechanische Lüftung erforderlich.⁸⁴³ Die Betriebsstunden der Lüftungsanlage beschränken sich somit auf Ereignisfälle, Probetrieb und Fehlalarme. Ereignisfälle sind als besondere Situationen einzustufen und dem jeweiligen Verursacher zuzuweisen, so dass an dieser Stelle keine Berücksichtigung erfolgt. Die Betriebsdauer bestimmt sich letztlich nur über die Dauer und Häufigkeit der Probetriebe bzw. Fehlalarme. Bei einem Probetrieb wird die Anlage vierteljährlich ca. 30 min unter Volllast betrieben. Fehlalarme sind Ereignisfällen gleichzusetzen, so dass das standardmäßige Notfallprogramm abläuft. Dabei werden in der Ereignisröhre alle Lüfter angefahren. Im zweiten Tunnel werden sechs Lüfter betrieben um einen Überdruck herzustellen, so dass ein Rauchübertritt verhindert werden kann. Die Anzahl der Fehlalarme wird nach MARNY mit 12 Stück pro Jahr und einer Betriebsdauer von durchschnittlich 15 min angesetzt.⁸⁴⁴

Reinigung:

Die Tunnellüfter sind ebenso wie die Sensoren regelmäßig von Staub, Ruß und groben Verunreinigungen zu befreien.

Inspektion:

Die Inspektion umfasst die jährliche Kontrolle sowie die zyklische Prüfung der einzelnen Modulkomponenten zur Sicherstellung der Funktionsfähigkeit. Die Inspektionszyklen und die dabei zu untersuchenden Bauelemente sind durch Anhang 2 der Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegeben.⁸⁴⁵

Wartung:

Im Rahmen der Wartung sind Verschleißteile auszutauschen bzw. bewegliche Teile der Lüftung mit Schmierstoffen zu versorgen. Die erforderlichen Prüfgase für die Sensoren zur CO- und Sichttrübe-Messung sind regelmäßig nachzufüllen.

Instandsetzung:

Die Instandsetzung beinhaltet alle außerplanmäßigen Leistungen zur Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit der Tunnellüftung. Aufgrund der durch die Reparaturarbeiten notwendigen Streckensperrung, wird bei Ausfall eines Strahlventilators ein vollständiger Austausch mit einem Ersatzlüfter vorgenommen. Das defekte Bauteil wird

⁸⁴³ siehe auch Parameterstudie zur Bestimmung der Schnittstellen (Abs. A.2.3.1.8)

⁸⁴⁴ vgl. MARNY (2012), S. 72

⁸⁴⁵ vgl. FSV (2014)c, Anhang 2

anschließend an einem externen Ort instandgesetzt und als Ersatzlüfter vorgehalten. Die Sensoren können vor Ort repariert bzw. ausgetauscht werden.

Für die Strahlventilatoren wird eine Frühausfallrate von 0,5 % abgeschätzt. Das bedeutet, dass bei einer Lebensdauer von 20 Jahren und 22 Lüftern 1 Lüfter vorzeitig getauscht werden muss. Die Frühausfallrate der Sensorik wird mit 1 % abgeschätzt, was dazu führt, dass ebenfalls jeweils ein CO- / Sichttrübe- sowie ein Luftgeschwindigkeitsmessgerät bis zur Erneuerung der Anlage ersetzt werden muss.

Zusätzlich sind fortlaufend Reparaturarbeiten an der Gesamtanlage vorzunehmen. Dabei wird eine auf die Betriebsdauer bezogene Steigerung bis zur geplanten Erneuerung berücksichtigt.⁸⁴⁶ Durch die dreijährige Gewährleistungsfrist gemäß ÖNORM B 2110 sind die in diesem Zeitraum anfallenden Leistungen durch den Ersteller zu erbringen und werden an dieser Stelle nicht einbezogen.⁸⁴⁷

Erneuerung:

Zur planmäßigen Erneuerung der Lüftungsanlage bzw. der Sensorik sind im Vorfeld Planungsleistungen zu erbringen. Zusätzlich sind die bereits vorhandenen Elemente zurückzubauen und zu entsorgen. Anschließend sind die neuen, technisch gleichwertigen Bauteile einzubauen und die notwendigen Messungen und Einstellungen vorzunehmen. Es gilt die unterschiedlichen Lebensdauern der einzelnen Elemente (Strahlventilatoren ca. 20 Jahre, Sensorik ca. 15 Jahre) zu berücksichtigen.

A.2.3.1.6 Kosten

Die Kalkulation der Kosten für die einzelnen Teilleistungen basiert auf realen Größen, in der Literatur veröffentlichten Werten, normativen Vorgaben bzw. eigenständigen Abschätzungen. Zur Kostenermittlung werden beide Tunnelröhren einbezogen (Abs. A.3.5).

Planung:

Die Bestimmung der Planungskosten erfolgt in Anlehnung an die deutsche Honorarordnung (HOAI) – Fachgebiete Objektplanung Ingenieurbauwerke (§ 44) und Technische Ausrüstung (§ 56).⁸⁴⁸ Die Verwaltungskosten (Prüfung, Bauüberwachung) werden über Personalaufwendungen abgeschätzt (Abs. A.3.5.1).⁸⁴⁹

Planung und Verwaltung:	250.500,00 €
-------------------------	--------------

Umsetzung:

Die Kosten für die funktionsfähige Errichtung der Lüftungsanlage werden eigenständig kalkuliert. Auf Basis von vorhandenen Ausschreibungsunterlagen werden Einheitspreise erhoben, auf den Bezugszeitpunkt 2014 umgerechnet und Mittelwerte abgeleitet (Abs. A.3.5.2).

Umsetzung:	641.700,00 €
------------	--------------

⁸⁴⁶ Der Anstieg der Aufwendungen wird in Anlehnung an die Wartungsarbeiten am Tunnelgewölbe mit einer Funktion achten Grades abgeschätzt. (vgl. Abs. A.2.1.1.5)

⁸⁴⁷ vgl. ÖNORM B 2110 (2013) – Abschnitt 5.45

⁸⁴⁸ vgl. HOAI (2013), § 44 bzw. § 56

Für die anrechenbaren Kosten zur Bestimmung der Planungskosten wird auf die Umsetzungskosten zurückgegriffen. Dabei wird ein pauschaler Abschlag einbezogen um berücksichtigen zu können, dass es sich hier nur um Teilleistungen für die Gesamtplanung handelt.

⁸⁴⁹ In den Verwaltungskosten ist ein Zuschlag für die Gemeinkosten in Höhe von 20 % berücksichtigt. vgl. BMV (2001), S. 45; BMVBS (2013)B, S. 65

Versorgung:

Die Versorgungskosten umfassen ausschließlich die Kosten für die Energieversorgung. Dazu sind die tatsächlichen, jährlichen Betriebsstunden der einzelnen Lüfter, deren jeweilige Leistungsaufnahme und der aktuelle Energiepreis zusammenzuführen. Aus der Tatsache heraus, dass im Regelbetrieb keine Lüftung notwendig ist, wären keine Energiekosten zu berücksichtigen. Allerdings resultieren aus Ereignisfällen, Probebetrieben zu Kontrolle der Funktionsfähigkeit oder auch möglichen Fehlalarmen Stromkosten für den Lüfterbetrieb. Ereignisfälle werden an dieser Stelle jedoch nicht einbezogen, da hierfür grundsätzlich der Verursacher in Haftung zu nehmen wäre. Für die Energiekosten aus dem Lüftungsbetrieb wird einzig auf die Betriebsdauern für den Probebetrieb und die Fehlalarme abgestellt. Zusätzlich werden die Energiekosten für die dauerhaft zu betreibende Sensorik einbezogen (Abs. A.3.5.3).

Energieversorgung:	900,00 €
--------------------	----------

Reinigung:

Die Kosten für die Reinigung der Ventilatoren werden über den Aufwand und den daraus resultierenden Personal- und Gerätekosten abgeschätzt (Abs. A.3.5.4). Die Reinigung der Sensorik erfolgt zusammen mit der Kontrolle und Prüfung, so dass an dieser Stelle kein Ansatz erfolgt.

Reinigung:	1.100,00 €
------------	------------

Inspektion:

Die Kosten für die Inspektion werden durch Abschätzung des Leistungsaufwandes für die einzelnen Teilleistungen bestimmt. Dabei wird zwischen den Kosten für die jährlich stattfindende Kontrolle (Abs. A.3.5.5) und den zusätzlichen Kosten für die Prüfung (Abs. A.3.5.6) unterschieden.

Inspektion – Kontrolle:	2.200,00 €
Inspektion – Prüfung:	3.200,00 €

Wartung:

Für die Wartung werden die Kosten über den zeitlichen Aufwand sowie über Material und Geräte abgeschätzt (Abs. A.3.5.7).

Wartung:	1.500,00 €
----------	------------

Instandsetzung:

Für die Instandsetzungsarbeiten wird der Ausfall und die Reparatur eines Lüfters (Abs. A.3.5.9), der Austausch eines Lüfters gegen ein Neugerät (Abs. A.3.5.10) sowie der Austausch von defekten Sensoren (Abs. A.3.5.11) getrennt erfasst. Zusätzlich werden die Kosten für jährliche Reparaturarbeiten abgeschätzt. Für diese wird eine kontinuierliche Steigerung der Aufwendungen bis zur Modulerneuerung berücksichtigt (Abs. A.3.5.8).⁸⁵⁰

Instandsetzung – sonstige Reparaturarbeiten:	1.200,00 €
Instandsetzung – Reparatur Lüfter:	5.100,00 €
Instandsetzung – Austausch Sensorik:	13.800,00 €
Instandsetzung – Austausch Lüfter:	22.200,00 €

⁸⁵⁰ vgl. Leistungen und Kosten für die Einfahrtsbeleuchtung (Abs. A.2.2.1.5 bzw. A.2.2.1.6)

Erneuerung:

Die durchschnittliche Lebensdauer der Tunnellüftung beträgt 20 Jahre, die der Sensorik 15 Jahre.⁸⁵¹ Danach wird die Lüftungsanlage bzw. die Sensorik durch eine neue, technisch vergleichbare Anlage ersetzt. Die Leistungen der Erneuerung erfassen den Rückbau und die Entsorgung der bestehenden sowie die Planung und den Einbau der neuen Anlage. Zusätzlich werden die Verwaltungskosten über einen Stundenaufwand abgeschätzt (Abs. A.3.5.12 und Abs. A.3.5.13).

Erneuerung – Sensorik:	110.500,00 €
Erneuerung – Lüfter:	619.200,00 €

A.2.3.1.7 Zeitliche Parameter

Planung & Umsetzung:

Der Anfallszeitpunkt für die Kosten der Planung und Umsetzung wird per Definition auf den Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung (Ende Herstellungsphase – Beginn Nutzungsphase) gelegt.

Versorgung:

Die Kosten für die Energieversorgung der Lüftungsanlage sind als jährliche Kosten zu berücksichtigen.

Versorgung:	1x jährlich
-------------	-------------

Reinigung:

Die Reinigung der Lüfter erfolgt in einem jährlichen Zyklus. Zur Ausnutzung von Synergien sind die Reinigungsarbeiten mit der Reinigung anderer Module abzustimmen.

Reinigung:	1x jährlich
------------	-------------

Inspektion:

Die Häufigkeit der unterschiedlichen Inspektionsmaßnahmen (Kontrolle oder Prüfung) ist durch die Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegeben.⁸⁵²

Inspektion – Kontrolle:	1 x jährlich
Inspektion – Prüfung:	1 x jährlich

Wartung:

Die unter dem Prozess Wartung zusammengefassten Leistungen für die Lüftungsanlage sind jährlich zu erbringen.

Wartung:	1 x jährlich
----------	--------------

Instandsetzung:

Die Reparaturarbeiten an der Lüftungsanlage werden als jährlich anfallende Leistungen berücksichtigt. Der Ausfall eines Strahlventilators und der damit verbundene Einbau eines neuen Lüfters werden während der Nutzungsdauer der Lüftungsanlage einmalig, vereinfacht nach zehn Jahren angesetzt.

⁸⁵¹ vgl. FSV (2014)c, Anhang 1

Die durchschnittliche Lebensdauer wird an dieser Stelle der geplanten Nutzungsdauer gleichgesetzt.

⁸⁵² vgl. FSV (2014)c, Anhang 2

Im Abstand von fünf Jahren sind der Austausch eines Lüfters und die anschließende Reparatur einzuplanen.

Der Austausch der Sensorik wird vereinfacht als einmalige Leistung nach acht Jahren Betriebsdauer angesetzt.

Instandsetzung – sonstige Reparaturarbeiten:	1x jährlich
Instandsetzung – Reparatur Lüfter:	alle 5 Jahre
Instandsetzung – Austausch Lüfter:	nach 10 Jahren
Instandsetzung – Austausch Sensorik:	nach 8 Jahren

Erneuerung:

Ausgehend von den in der Richtlinie RVS 13.03.41 vorgegebenen durchschnittlichen Lebensdauern, erfolgt eine Erneuerung der Lüfter in einem Zyklus von 20 Jahren. Die Sensorik wird nach 15 Jahren Betriebszeit erneuert.⁸⁵³

Erneuerung – Sensorik:	alle 15 Jahre
Erneuerung – Lüftung:	alle 20 Jahre

A.2.3.1.8 Parameterstudie zur Eingrenzung der Schnittstellen

Zur Bestimmung der Schnittstellen wird auf die technischen Vorschriften und Richtlinien (z. B. RVS 09.02.31, RVS 09.02.32, PLaPB – Tunnel-Lüftung) sowie verschiedene Veröffentlichungen zur Dimensionierung der Tunnellüftung zurückgegriffen.⁸⁵⁴ Aufgrund der Vielzahl an Einflussgrößen erfolgt im weiteren Schritt eine Eingrenzung auf die wesentlichen Parameter, so dass eine Anwendbarkeit gewährleistet wird.

Anders als für die Beleuchtung, gibt es für die Tunnellüftung unterschiedliche Ansätze, die gestellten sicherheitstechnischen Anforderungen an die Tunnelluft zu erfüllen. Die Wahl des Lüftungssystems wird dabei wesentlich durch die Betriebsart (Gegenverkehr, Richtungsverkehr), die Verkehrsstärke, den Verkehrsfluss, die Bauwerksgestaltung (Bauwerkslänge, Tunnelquerschnitt usw.) sowie die Umfeldsituation (Immissionsschutz usw.) bestimmt. Weiteres Kriterium stellt die Wirtschaftlichkeit des gewählten Systems dar.⁸⁵⁵

Zur Dimensionierung der Lüftungsanlage ist zwischen den beiden Betriebsfällen Regelbetrieb und Ereignisfall (Brand) zu unterscheiden. Die voranschreitende Entwicklung hinsichtlich der Reduzierung der Emissionen von Fahrzeugen ermöglicht für den Regelbetrieb immer häufiger einen Verzicht eines dauerhaften Lüftungsbetriebs.⁸⁵⁶ Dazu ist nachzuweisen, dass die natürliche Luftbewegung für die Lüftung im Regelbetrieb ausreichend ist (Abbildung A.2.42). Kann der Nachweis erbracht werden, ist daraus zu schließen, dass die Erstkosten (Dimensionierung) – und damit auch die Betriebskosten – im Wesentlichen durch den Ereignisfall bestimmt werden.

⁸⁵³ vgl. FSV (2014)c, S. 10

⁸⁵⁴ vgl. FSV (2014)b; FSV (2010); ASFINAG (2012)b; ASFINAG (2012)c; BMV (1990); POKORNY, WEISS, KRÖNKE (1981); FREIBAUER (1978); HERZKE (1972); FGSV (2006)

⁸⁵⁵ vgl. FSV (2014)b, S. 4 ff.

⁸⁵⁶ vgl. WEHNER, REINKE (2003), S. 132
siehe auch Emissionstabellen FSV (2010), S. 7 ff.

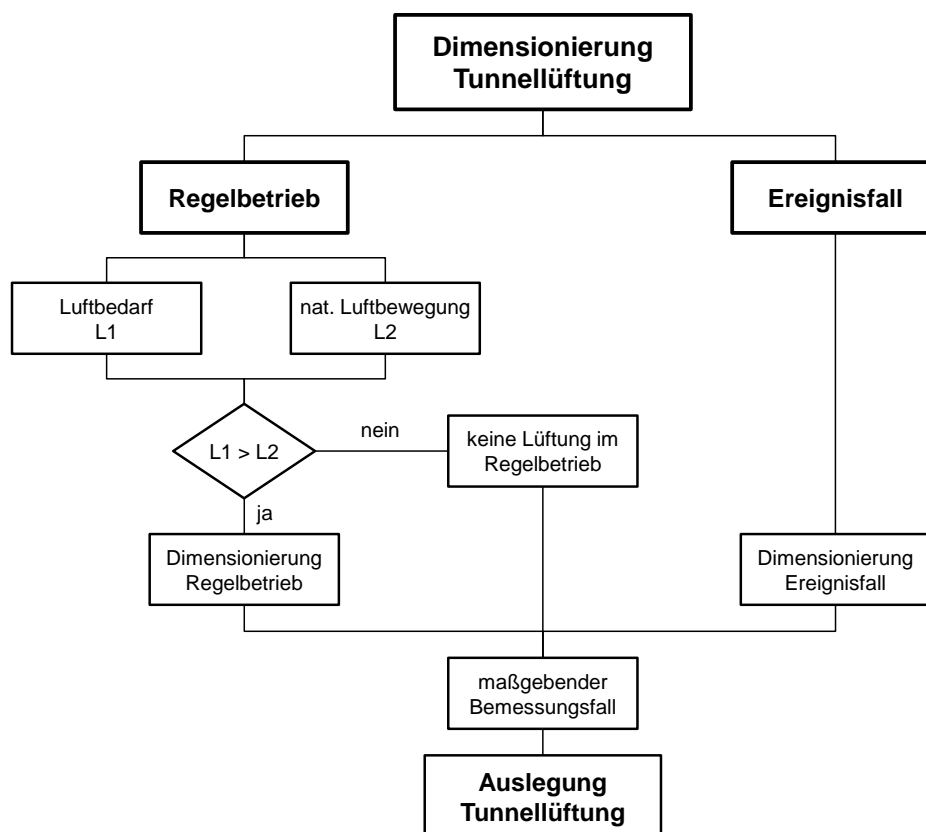


Abbildung A.2.42: Ablauf zur Dimensionierung der Tunnellüftung⁸⁵⁷

Die Bestimmung des Luftbedarfs erfolgt hinsichtlich der Einhaltung der Grenzwerte für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Trübe nach RVS 09.02.32. Dabei entscheidend ist die Betriebsart, Verkehrszusammensetzung, Fahrgeschwindigkeit und Tunnellänge. Die jeweiligen Emissionswerte sind tabellarisch, in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Steigung, für PKW und LKW durch die Normenwerke vorgegeben.⁸⁵⁸

Die natürliche Luftbewegung wird, insbesondere bei Richtungsverkehrstunneln, überwiegend durch die Bewegung der Fahrzeuge und der daraus resultierenden Kolbenwirkung erzeugt. Zusätzlich zeichnen sich barometrische Druckdifferenzen zwischen den Tunnelportalen und Windeinwirkungen auf die Portale für den natürlichen Luftaustausch verantwortlich.⁸⁵⁹ Näherungsweise ist nach HAERTER von einer stationären Bewegung auszugehen.⁸⁶⁰ Aus dieser Annahme heraus kann die fahrzeuginduzierte Luftströmung mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes bestimmt werden. Der Einfluss der barometrischen Druckdifferenzen wird dabei vernachlässigt. Entsprechende Gleichungen zur Berechnung der natürlichen Luftbewegung wurden u. a. von HERZKE hergeleitet (Formel (A.2.52)).⁸⁶¹

⁸⁵⁷ Eigene Darstellung – aus den Regelwerken und den darin enthaltenen Bemessungsschritten abgeleitet. vgl. FGSV (2006); FSV (2010); FSV (2014)_B; ASFINAG (2012)_B

⁸⁵⁸ vgl. FSV (2010), S. 3 ff.

An dieser Stelle sei an den dort angeführten Rechengang verwiesen.

⁸⁵⁹ vgl. POKORNY, WEISS, KRÖNKE (1981), S. 49 ff.

⁸⁶⁰ vgl. HAERTER (1961), S. 31

⁸⁶¹ vgl. HERZKE (1972), S. 65 ff.

$$u_v = \frac{v}{1 + 60 \cdot \sqrt{\frac{\zeta_a + \zeta_e + \frac{\lambda \cdot L}{D_h}}{L}} \cdot \sqrt{\frac{A_T \cdot v}{M \cdot (1 - a_L) \cdot c_w A_{PKW} + M \cdot a_L \cdot c_w A_{LKW}}} \quad (\text{A.2.52})$$

mit:

u_v	[m/s]	induzierte Strömungsgeschwindigkeit
M	[Kfz/h]	Verkehrsdichte
a_L	[%]	LKW - Anteil
v	[km/h]	Geschwindigkeit Verkehr
L	[m]	Tunnellänge
A_T	[m ²]	Querschnittsfläche Tunnel
D_h	[m]	hydraulischer Durchmesser
ζ_e	[-]	Einlassbeiwert
ζ_a	[-]	Auslassbeiwert
λ	[-]	Reibungsbeiwert (Tunnelwandung)
$c_w A_{PKW}$	[m ²]	Widerstandsfläche PKW ⁸⁶²
$c_w A_{LKW}$	[m ²]	Widerstandsfläche LKW ⁸⁶³

Folgende Rechengrößen sind dabei als veränderlich anzusehen und stellen aus diesem Grund mögliche Einflussgrößen für die Kosten einer Lüftungsanlage dar:

- Verkehrsdichte
 - LKW-Anteil
 - Geschwindigkeit
 - Tunnellänge
 - Tunnelquerschnitt
 - Tunnelumfang
 - Strömungsbeiwerte für Ein- und Auslass
 - Reibungsbeiwert Tunnelwand
- } hydraulischer Durchmesser

Zur Bewertung des Ereignisfalls (Brand) wird anstelle des Luftbedarfs, die Schubkraft bestimmt, die zum abführen des Rauches erforderlich ist. Dazu wird, ausgehend von der vorhandenen Druckdifferenz, der notwendige Schub ermittelt um den Rauch gezielt abführen zu können. Der vorherrschende Druckunterschied resultiert dabei aus dem Auftrieb der erhitzten Luft und der natürlichen Luftbewegung, den Druckverlusten aus der Widerstandsfläche der stehenden Fahrzeuge zwischen Brandstelle und Portal, aus Strömungsverlusten sowie dem Winddruck auf das Portal. Dem Gegenüber ist eine ausreichende Anzahl an Lüftern im Tunnel zu platzieren, die die erforderliche Schubkraft aufbringen können. ⁸⁶⁴

⁸⁶² $c_w A_{PKW} = 0,9 \text{ m}^2$ gem. ASFINAG (2012)B, S. 30

⁸⁶³ $c_w A_{LKW} = 5,2 \text{ m}^2$ gem. ASFINAG (2012)B, S. 30

⁸⁶⁴ vgl. ASTRA (2008), S. 30; POKORNY, WEISS, KRÖNKE (1981), S. 52 ff.

Dabei muss gelten:

$$S_{Lüftung} > S_{Brand} \quad (\text{A.2.53})$$

mit:

$S_{Lüftung}$	[N]	Schub aus Lüftung
S_{Brand}	[N]	Schub aus Brand

Die erforderliche Schubkraft errechnet sich aus:

$$S_{Brand} = (\Delta p_{nat} + \Delta p_R + \Delta p_F + \Delta p_{Brand} + \Delta p_W) \cdot A_T \quad (\text{A.2.54})$$

mit:

Δp_{nat}	[Pa]	natürlicher Druck (als Gegendruck)
Δp_R	[Pa]	Druckverlust aus Wandreibung
Δp_F	[Pa]	Druckverlust aus Fahrzeugen zwischen Brand und Portal
Δp_{Brand}	[Pa]	Druckdifferenz aus Auftrieb bei Brand
Δp_W	[Pa]	Druck aus Wind am Portal
A_T	[m ²]	Querschnittsfläche Tunnel

Druckwirkung aus natürlicher Luftströmung:

$$\Delta p_{nat} = (\rho_a - \rho_i) \cdot g \cdot L \cdot s \quad (\text{A.2.55})$$

mit:

ρ_a	[kg/m ³]	Luftdichte vor dem Tunnel	$\rho_a = p_{atm} / R_L \cdot T_a$
ρ_i	[kg/m ³]	Luftdichte im Tunnel	$\rho_i = p_{atm} / R_L \cdot T_i$
p_{atm}	[Pa]	Atmosphärischer Druck	
R_L	[J/kgK]	Gaskonstante Luft	
T_a	[K]	Temperatur vor dem Tunnel	
T_i	[K]	Temperatur im Tunnel	
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung	
L	[m]	Tunnellänge	
s	[%]	Steigung	

Druckwirkung aus Wandreibung:

$$\Delta p_R = \frac{\rho_i}{2} \cdot \left(\zeta_e + \zeta_a + \frac{\lambda \cdot L}{D_h} \right) \cdot u_T \quad (\text{A.2.56})$$

mit:

ρ_i	[kg/m ³]	Luftdichte im Tunnel
ζ_e	[-]	Einlassbeiwert
ζ_a	[-]	Auslassbeiwert
λ	[-]	Reibungsbeiwert (Tunnelwandung)
L	[m]	Tunnellänge
D_h	[m]	hydraulischer Durchmesser
u_T	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel

Druckverlust aus Fahrzeugen zwischen Brandstelle und Portal:

$$\Delta p_R = \frac{\rho_i}{2} \cdot (v - u_T)^2 \cdot \frac{D_0 \cdot L_{Brand}}{A_T} \cdot (c_w A_{PKW} \cdot (1 - a_L) + c_w A_{LKW} \cdot a_L) \quad (\text{A.2.57})$$

mit:

ρ_i	[kg/m ³]	Luftdichte im Tunnel
v	[m/s]	Geschwindigkeit Fahrzeuge (bei Brand => Stau => $v = 0$ m/s)
u_T	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel
D_0	[kfz/m]	Verkehrsdichte (bei $v = 0 \rightarrow D_0 = 150$ kfz/km u. Fahrstreifen)
L_{Brand}	[m]	Strecke Brandstelle – Portal
A_T	[m ²]	Querschnittsfläche Tunnel
$c_w A_{PKW}$	[m ²]	Widerstandsfläche PKW ⁸⁶⁵
$c_w A_{LKW}$	[m ²]	Widerstandsfläche LKW ⁸⁶⁶
a_L	[%]	LKW - Anteil

Druckdifferenz aus Auftrieb bei Brand:

$$\Delta p_{Brand} = (\rho_i - \rho_{Brand}) \cdot g \cdot L_{Brand} \cdot s \quad (\text{A.2.58})$$

mit:

ρ_i	[kg/m ³]	Luftdichte im Tunnel
ρ_{Brand}	[kg/m ³]	Luftdichte an der Brandstelle $\rho_{Brand} = \frac{p_{atm}}{R_L \cdot T_{Brand}}$
T_{Brand}	[K]	Temperatur Brand
L_{Brand}	[m]	Strecke Brandstelle – Portal
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
s	[%]	Steigung

Winddruck am Portal:

$$\Delta p_W = \frac{\rho_a}{2} \cdot u_W^2 \quad (\text{A.2.59})$$

mit:

ρ_a	[kg/m ³]	Luftdichte vor dem Tunnel
u_W	[m/s]	Windgeschwindigkeit in 4 m über Boden

Schub aus Lüftung:

$$S_{Lüftung} = \frac{S_N}{k} \cdot \left(1 - \frac{u_T}{u_S}\right) \quad (\text{A.2.60})$$

mit:

S_N	[N]	Standschub
k	[-]	Beiwert zur Berücksichtigung von Wandverlusten ⁸⁶⁷
u_T	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel
u_S	[m/s]	Strahlaustrittsgeschwindigkeit Ventilator

⁸⁶⁵ $c_w A_{PKW} = 0,9$ m² gem. ASFINAG (2012)B, S. 30

⁸⁶⁶ $c_w A_{LKW} = 5,2$ m² gem. ASFINAG (2012)B, S. 30

⁸⁶⁷ vgl. BMV (1990), S. 77

Zur Bestimmung der Schnittstellen werden ausschließlich veränderliche Rechengrößen in den Untersuchungsumfang aufgenommen und bewertet. Diese umfassen:

- Tunnellänge
 - Tunnelquerschnitt
 - Tunnelumfang
 - Strömungsbeiwert für Einlass
 - Reibungsbeiwert Tunnelwand
 - Steigung
 - Abstand Brand / Portal
 - Temperaturen (innen, außen, Brandstelle)
 - Windgeschwindigkeiten
- } hydraulischer Durchmesser

Die Schubstärke der Lüfter wird durch folgende Faktoren beeinflusst:

- Standschub Lüfter
- Anbringung im Tunnelquerschnitt (Beiwert k)
- Strömungsgeschwindigkeit
- Strahlaustrittsgeschwindigkeit

Die Vielzahl an Schnittstellen erfordert eine Strukturierung in übergeordnete Themenbereiche. Die Art der Schnittstellen ermöglicht dabei eine Einteilung in die Bereiche Bauwerk, Verkehr und Lüfter. Die weitere Zusammenstellung der Schnittstellen erfolgt in Abbildung A.2.43. Dabei wird lediglich auf eine Längslüftung mit Strahlventilatoren abgestellt.

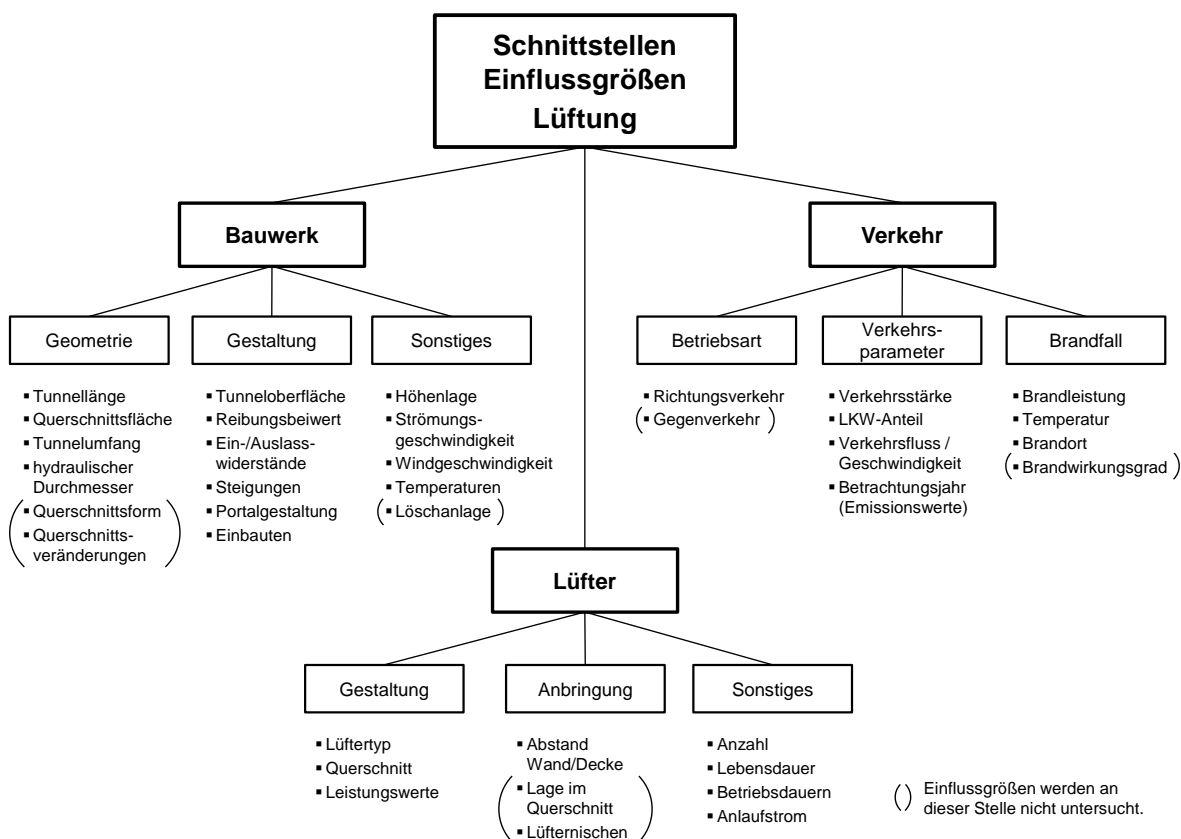


Abbildung A.2.43: Schnittstellen und Einflussgrößen der Tunnellüftung

Untersuchung Regelbetrieb

Zur Einschätzung, ob und wann eine Tunnellüftung im Regelbetrieb erforderlich sein wird, werden in einer Parameterstudie der Luftbedarf und die natürliche Luftmenge unterschiedlicher Systemausgestaltungen gegenübergestellt. Zur Ermittlung der notwendigen Parameter wird auf den Referenztunnel zurückgegriffen, der zur Bewertung der Schnittstellen der Beleuchtung bereits Anwendung gefunden hat.⁸⁶⁸ Der Querschnitt wird vereinfacht als konstant, ohne große Einbauten, Abzweigungen oder sonstige Querschnittsveränderungen angenommen (Abbildung A.2.44).

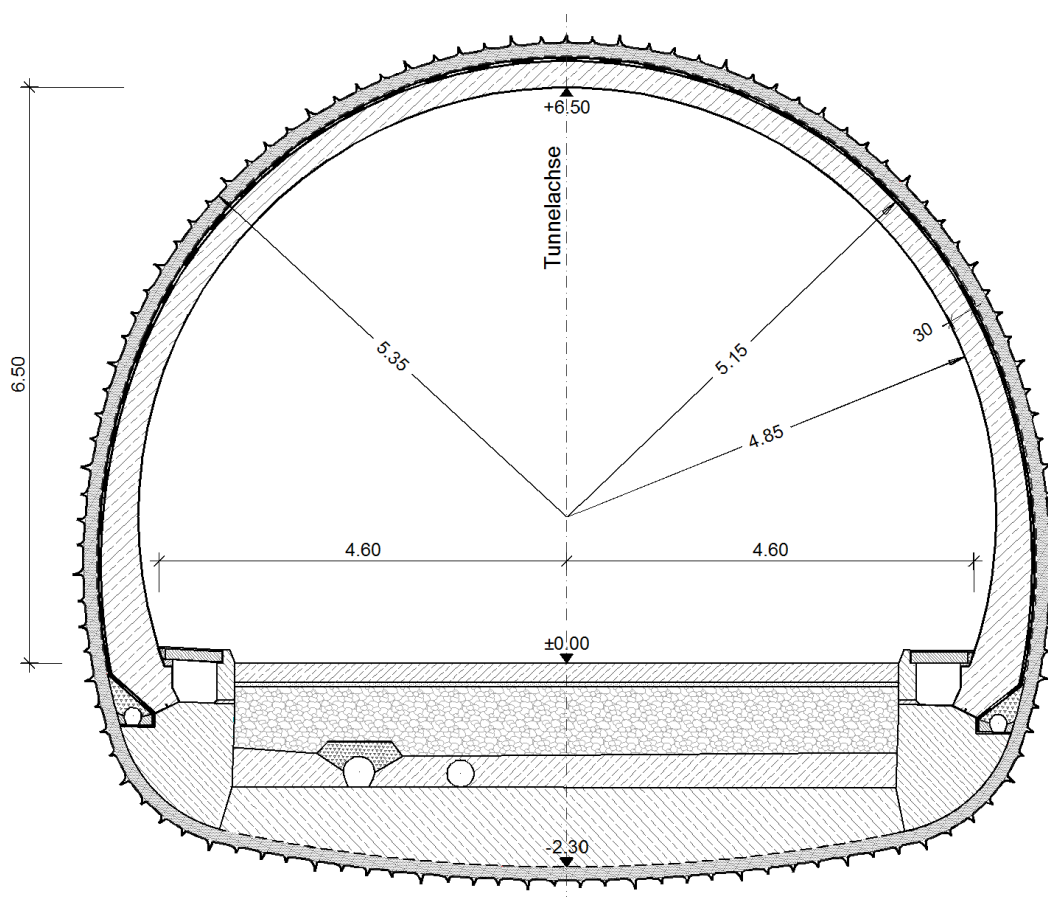


Abbildung A.2.44: Querschnitt Referenztunnel

Die erforderlichen Eingangsparameter für den Referenztunnel sind in Tabelle A.2.12 zusammengefasst.

Die Berechnung des Luftbedarfs erfolgt anhand des in RVS 09.02.32 aufgezeigten Rechengangs sowie den vorgegebenen Berechnungsgrößen (Tabelle A.2.12).⁸⁶⁹ Ausgehend von den Berechnungen für den Referenztunnel, erfolgt eine Bewertung der Veränderung der Ergebnisgröße infolge der Parameteränderung. Die Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung des Luftbedarfs sind in Tabelle A.2.13 zusammengefasst.

Für die Bestimmung der natürlichen Luftbewegung wird auf den von HERZKE hergeleiteten Rechenweg zurückgegriffen (Formel (A.2.52)). Es erfolgt auch hier eine Gegenüberstellung der einzelnen Berechnungsergebnisse mit den Größen des Referenztunnels. Die Ergebnisse hinsichtlich der natürlichen Luftbewegung sind Tabelle A.2.14 zu entnehmen.

⁸⁶⁸ siehe Abs. A.2.2.1.8

⁸⁶⁹ vgl. FSV (2010), S. 3 ff.; Emissionsbeiwerte gem. Tabellen FSV (2010), S. 7 ff.

Tabelle A.2.12: Eingangsgrößen für Luftbedarf und natürliche Luftbewegung

Luftbedarf			natürliche Luftbewegung		
maßg. Verkehrsstärke	MSV	1.000 Kfz/h	maßg. Verkehrsstärke	MSV	1.000 Kfz/h
LKW-Anteil	a_L	10 %	LKW-Anteil	a_L	10 %
Anteil PKW - Benzin	$a_{PKW,B}$	37 %	Tunnellänge	L_{Tunnel}	1.000 m
Anteil PKW - Diesel	$a_{PKW,D}$	63 %	Querschnitt	A	52,5 m ²
Umrechnung LKW-PKW-E	g_L	2,5 PKW-E/LKW	Umfang	U	27,8 m
max. Verkehrsstärke	M_{max}	1.800 PKW-E/h	hydraulischer Durchmesser	D_h	7,6 m
Anzahl Streifen	-	2 -	Wandreibungskoeffizient	λ	0,015 -
Verkehrsdichte - Stillstand	D_0	150 PKW-E/km	Verlustkoeffizient - Einströmen	ζ_E	0,3 -
Tunnellänge	L	1.000 m	Verlustkoeffizient - Ausströmen	ζ_A	1,0 -
Steigung	s	-2,0 %	Verkehrsgeschwindigkeit	v_{PKW}	60 km/h
Höhenlage	H_{NHN}	1.500 m	Widerstandsfläche PKW	$c_w A_{PKW}$	0,9 m ²
Geschwindigkeit	v_{PKW}	60 km/h	Widerstandsfläche LKW	$c_w A_{LKW}$	5,2 m ²
zul. Höchstgeschwindigkeit	v_{zul}	100 km/h			
Grenzgeschwindigkeit	v_{gr}	100 km/h			
Bezugsjahr	-	2015 -			
Planungsgrenzwert CO	$c_{CO,zul}$	100 ppm			
Dichte CO	ρ_{CO}	1,184 kg/m ³			
Planungsgrenzwert Trübe	k_{zul}	0,007 1/m			
Planungsgrenzwert NO ₂	$c_{NO_2,zul}$	30 µg/m ³			
Dichte NO ₂	ρ_{NO_2}	1,950 kg/m ³			

unveränderliche Vorgaben

Bewertung

In Tabelle A.2.15 erfolgt eine Gegenüberstellung von Luftbedarf und Luftaustausch durch natürliche Luftbewegung. Der Vergleich beschränkt sich dabei auf die wesentlichen Einflussgrößen aus den beiden Parameterstudien.

Wie die Gegenüberstellung zeigt, beträgt in allen Fällen, ausgenommen bei stehendem Verkehr ($v = 0$ km/h), die erforderliche Luftmenge nur einen Bruchteil des natürlichen Luftstroms. Bei stehendem Verkehr reicht jedoch bereits ein sehr geringer Luftstrom von ca. 0,25 m/s aus, um eine ausreichende Luftwechselrate zu erzielen. Hierfür würden geringe barometrische Druckdifferenzen oder auch ein geringer Winddruck genügen, so dass von einer ausreichenden Luftbewegung, auch in Stausituationen, auszugehen ist.

Die max. zulässige Strömungsgeschwindigkeit von $u_v = 10$ m/s ist als weiteres Kriterium in keinem Fall überschritten worden, so dass die wesentlichen Anforderungen erfüllt sind.⁸⁷⁰

Aus den vorgenommenen Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass eine mechanische Lüftungsanlage für den Regelbetrieb nicht erforderlich ist. Dies deckt sich mit den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen.⁸⁷¹ Die maßgeblichen Schnittstellen sind letztlich nur aus dem Ereignisfall abzuleiten.

⁸⁷⁰ vgl. FSV (2014)_B, S. 4 – Abs. 3.2.4

⁸⁷¹ vgl. u. a. HERZKE (1972); FREIBAUER (1978); BMV (1990)

Tabelle A.2.13: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bewertung des Luftbedarfs

	Veränderlicher Parameter	Luftbedarf aus CO q_{CO}	Luftbedarf aus Trübe q_{Tr}	Luftbedarf aus NO _x q_{NOx}	Veränderung Luftbedarf CO		Veränderung Luftbedarf Trübe		Veränderung Luftbedarf NO _x	
Mustertunnel										
		1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s						
Verkehr	Verkehrsdichte									
	1 kfz/h	0,0 m³/s	0,0 m³/s	0,0 m³/s	-100%		-100%		-100%	
	500 kfz/h	0,6 m³/s	2,7 m³/s	1,0 m³/s	-54%		-50%		-50%	
	1.000 kfz/h	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%	
	1.500 kfz/h	1,9 m³/s	7,9 m³/s	3,0 m³/s	46%		49%		50%	
	2.000 kfz/h	2,5 m³/s	10,4 m³/s	4,0 m³/s	92%		98%		98%	
	2.500 kfz/h	3,1 m³/s	13,0 m³/s	4,9 m³/s	138%		146%		147%	
	3.000 kfz/h	3,7 m³/s	15,5 m³/s	5,9 m³/s	185%		194%		194%	
	3.500 kfz/h	3,9 m³/s	16,1 m³/s	6,1 m³/s	200%		206%		207%	
	LKW-Anteil									
	0 %	1,3 m³/s	3,4 m³/s	0,9 m³/s	0%		-36%		-56%	
	5 %	1,3 m³/s	4,3 m³/s	1,4 m³/s	-1%		-18%		-28%	
	10 %	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	-2%		0%		0%	
	15 %	1,3 m³/s	6,2 m³/s	2,6 m³/s	-3%		18%		28%	
	20 %	1,2 m³/s	7,2 m³/s	3,1 m³/s	-4%		36%		56%	
	25 %	1,2 m³/s	8,1 m³/s	3,7 m³/s	-5%		54%		84%	
	Geschwindigkeit									
	0 km/h	6,3 m³/s	10,5 m³/s	3,5 m³/s		385%		100%		77%
	10 km/h	3,1 m³/s	7,0 m³/s	5,2 m³/s		138%		34%		162%
	20 km/h	2,3 m³/s	6,2 m³/s	3,6 m³/s		77%		17%		83%
	30 km/h	1,8 m³/s	5,9 m³/s	2,9 m³/s		38%		13%		48%
	40 km/h	1,6 m³/s	5,7 m³/s	2,5 m³/s		23%		7%		25%
	50 km/h	1,4 m³/s	5,4 m³/s	2,2 m³/s		8%		2%		8%
	60 km/h	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s		0%		0%		0%
	70 km/h	1,2 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	-8%		0%			1%
	80 km/h	1,2 m³/s	5,3 m³/s	2,1 m³/s	-8%		1%			6%
	90 km/h	1,2 m³/s	5,5 m³/s	2,2 m³/s	-8%		3%			13%
	100 km/h	1,3 m³/s	5,6 m³/s	2,4 m³/s	0%		6%			22%
Betrachtungsjahr										
2010	1,8 m³/s	9,8 m³/s	3,0 m³/s	38%		87%		49%		
2015	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%		
2020	0,9 m³/s	3,0 m³/s	1,3 m³/s	-31%		-43%		-36%		
2025	0,6 m³/s	2,1 m³/s	1,0 m³/s	-54%		-60%		-52%		
2030	0,5 m³/s	1,7 m³/s	0,8 m³/s	-62%		-68%		-60%		
Bauwerke	Tunnellänge									
	0 m	0,0 m³/s	0,0 m³/s	0,0 m³/s	-100%		-100%		-100%	
	500 m	0,6 m³/s	2,6 m³/s	1,0 m³/s	-54%		-50%		-50%	
	1.000 m	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%	
	1.500 m	1,9 m³/s	7,9 m³/s	3,0 m³/s	46%		50%		50%	
	2.000 m	2,5 m³/s	10,5 m³/s	4,0 m³/s	92%		100%		101%	
	2.500 m	3,2 m³/s	13,2 m³/s	5,0 m³/s	146%		150%		150%	
	3.000 m	3,8 m³/s	15,8 m³/s	6,0 m³/s	192%		200%		201%	
	3.500 m	4,4 m³/s	18,4 m³/s	7,0 m³/s	238%		250%		251%	
	4.000 m	5,1 m³/s	21,1 m³/s	8,0 m³/s	292%		300%		301%	
	4.500 m	5,7 m³/s	23,7 m³/s	9,0 m³/s	338%		350%		351%	
	5.000 m	6,4 m³/s	26,3 m³/s	10,0 m³/s	392%		400%		401%	
	Steigung									
	-6 %	0,5 m³/s	3,7 m³/s	0,3 m³/s	-62%		-30%		-85%	
	-4 %	0,7 m³/s	3,8 m³/s	0,3 m³/s	-46%		-29%		-84%	
	-2 %	1,0 m³/s	4,1 m³/s	1,0 m³/s	-23%		-21%		-51%	
	0 %	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%	
	2 %	1,8 m³/s	6,5 m³/s	3,6 m³/s	38%		24%		80%	
	4 %	2,5 m³/s	7,8 m³/s	5,1 m³/s	92%		48%		154%	
	6 %	3,8 m³/s	9,0 m³/s	6,7 m³/s	192%		72%		235%	
	Sehöhe									
	0 m	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%	
	500 m	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%	
	1.000 m	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	0%		0%		0%	
	1.500 m	2,2 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	89%		0%		0%	
	2.000 m	2,4 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	85%		0%		0%	

Tabelle A.2.14: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bewertung der natürlichen Luftbewegung

	Veränderlicher Parameter	Induzierte Luftgeschwindigkeit u_v	Induzierte Luftstrom u	Veränderung Luftstrom	Veränderung Luftstrom
	Mustertunnel	4,4 m/s	230,9 m³/s	-	
Verkehr	Verkehrsdichte				
	1 kfz/h	0,2 m/s	9,8 m³/s	-96 %	-96%
	500 kfz/h	3,4 m/s	176,9 m³/s	-23 %	-23%
	1.000 kfz/h	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
	1.500 kfz/h	5,1 m/s	267,0 m³/s	16 %	16%
	2.000 kfz/h	5,6 m/s	294,4 m³/s	27 %	27%
	2.500 kfz/h	6,0 m/s	316,5 m³/s	37 %	37%
	3.000 kfz/h	6,4 m/s	335,2 m³/s	45 %	45%
	3.500 kfz/h	6,7 m/s	351,2 m³/s	52 %	52%
	LKW-Anteil				
	0 %	3,8 m/s	199,3 m³/s	-14 %	-14%
	5 %	4,1 m/s	216,2 m³/s	-6 %	-6%
	10 %	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
	15 %	4,6 m/s	243,9 m³/s	6 %	6%
	20 %	4,9 m/s	255,5 m³/s	11 %	11%
	25 %	5,1 m/s	266,0 m³/s	15 %	15%
	Geschwindigkeit				
	0 km/h	0,0 m/s	0,0 m³/s	-100 %	-100%
	10 km/h	1,3 m/s	68,2 m³/s	-70 %	-70%
	20 km/h	2,1 m/s	111,7 m³/s	-52 %	-52%
	30 km/h	2,8 m/s	147,2 m³/s	-36 %	-36%
	40 km/h	3,4 m/s	178,0 m³/s	-23 %	-23%
	50 km/h	3,9 m/s	205,6 m³/s	-11 %	-11%
	60 km/h	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
	70 km/h	4,8 m/s	254,4 m³/s	10 %	10%
	80 km/h	5,3 m/s	276,4 m³/s	20 %	20%
	90 km/h	5,7 m/s	297,2 m³/s	29 %	29%
	100 km/h	6,0 m/s	316,9 m³/s	37 %	37%
Bauwerk	Tunnellänge				
	100 m	2,4 m/s	125,8 m³/s	-46 %	-46%
	500 m	3,9 m/s	203,7 m³/s	-12 %	-12%
	1.000 m	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
	1.500 m	4,6 m/s	243,1 m³/s	5 %	5%
	2.000 m	4,8 m/s	250,1 m³/s	8 %	8%
	2.500 m	4,9 m/s	254,6 m³/s	10 %	10%
	3.000 m	4,9 m/s	257,8 m³/s	12 %	12%
	3.500 m	5,0 m/s	260,2 m³/s	13 %	13%
	4.000 m	5,0 m/s	262,0 m³/s	13 %	13%
	4.500 m	5,0 m/s	263,5 m³/s	14 %	14%
	5.000 m	5,0 m/s	264,7 m³/s	15 %	15%
	Tunnelquerschnitt				
	36,8 m²	4,6 m/s	169,3 m³/s	-27 %	-27%
	42,0 m²	4,5 m/s	190,4 m³/s	-18 %	-18%
	47,3 m²	4,5 m/s	210,9 m³/s	-9 %	-9%
	52,5 m²	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
	57,8 m²	4,3 m/s	250,4 m³/s	8 %	8%
	63,0 m²	4,3 m/s	269,4 m³/s	17 %	17%
	68,3 m²	4,2 m/s	287,9 m³/s	25 %	25%
	Tunnelumfang				
	19,5 m	4,7 m/s	248,3 m³/s	8 %	8%
	22,2 m	4,6 m/s	242,0 m³/s	5 %	5%
	25,0 m	4,5 m/s	236,2 m³/s	2 %	2%
	27,8 m	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
	30,6 m	4,3 m/s	225,9 m³/s	-2 %	-2%
	33,4 m	4,2 m/s	221,3 m³/s	-4 %	-4%
	36,1 m	4,1 m/s	217,0 m³/s	-6 %	-6%
	Reibungsbeiwert				
	0,010	4,8 m/s	250,5 m³/s	8 %	8%
	0,013	4,6 m/s	240,0 m³/s	4 %	4%
	0,015	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%
0,018	4,2 m/s	222,8 m³/s	-3 %	-3%	
0,020	4,1 m/s	215,6 m³/s	-7 %	-7%	
Einlasswiderstand					
0,1	4,5 m/s	236,3 m³/s	2 %	2%	
0,2	4,4 m/s	233,5 m³/s	1 %	1%	
0,3	4,4 m/s	230,9 m³/s	0 %	0%	
0,4	4,3 m/s	228,4 m³/s	-1 %	-1%	
0,5	4,3 m/s	225,9 m³/s	-2 %	-2%	
0,6	4,3 m/s	223,5 m³/s	-3 %	-3%	
0,7	4,2 m/s	221,3 m³/s	-4 %	-4%	
0,8	4,2 m/s	219,1 m³/s	-5 %	-5%	

Tabelle A.2.15: Gegenüberstellung Luftbedarf – natürliche Luftbewegung

	Veränderliche Parameter	Luftbedarf aus CO q _{CO}	Luftbedarf aus Trübe q _{Tr}	Luftbedarf aus NO _x q _{NOx}	max. Luftbedarf	induzierte Luftgeschwindigkeit u _v	induzierter Luftstrom u _v	Anteil Luftbedarf / nat. Luftstrom	Anteil Luftbedarf / nat. Luftstrom	
	Mustertunnel									
		1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s			
Verkehr	Verkehrsdichte									
	1 kfz/h	0,0 m³/s	0,0 m³/s	0,0 m³/s	0,0 m³/s	0,2 m/s	9,8 m³/s	0,1 %	0%	
	500 kfz/h	0,6 m³/s	2,7 m³/s	1,0 m³/s	2,7 m³/s	3,4 m/s	176,9 m³/s	1,5 %	1%	
	1.000 kfz/h	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,3 %	2%	
	1.500 kfz/h	1,9 m³/s	7,9 m³/s	3,0 m³/s	7,9 m³/s	5,1 m/s	267,0 m³/s	2,9 %	3%	
	2.000 kfz/h	2,5 m³/s	10,4 m³/s	4,0 m³/s	10,4 m³/s	5,6 m/s	294,4 m³/s	3,5 %	4%	
	2.500 kfz/h	3,1 m³/s	13,0 m³/s	4,9 m³/s	13,0 m³/s	6,0 m/s	316,5 m³/s	4,1 %	4%	
	3.000 kfz/h	3,7 m³/s	15,5 m³/s	5,9 m³/s	15,5 m³/s	6,4 m/s	335,2 m³/s	4,6 %	5%	
	3.500 kfz/h	3,9 m³/s	16,1 m³/s	6,1 m³/s	16,1 m³/s	6,7 m/s	351,2 m³/s	4,6 %	5%	
	LKW-Anteil									
	0 %	1,3 m³/s	3,4 m³/s	0,9 m³/s	3,4 m³/s	3,8 m/s	199,3 m³/s	1,7 %	2%	
	5 %	1,3 m³/s	4,3 m³/s	1,4 m³/s	4,3 m³/s	4,1 m/s	216,2 m³/s	2,0 %	2%	
	10 %	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,3 %	2%	
	15 %	1,3 m³/s	6,2 m³/s	2,6 m³/s	6,2 m³/s	4,6 m/s	243,9 m³/s	2,6 %	3%	
	20 %	1,2 m³/s	7,2 m³/s	3,1 m³/s	7,2 m³/s	4,9 m/s	255,5 m³/s	2,8 %	3%	
	25 %	1,2 m³/s	8,1 m³/s	3,7 m³/s	8,1 m³/s	5,1 m/s	266,0 m³/s	3,1 %	3%	
	Geschwindigkeit									
	0 km/h	6,3 m³/s	10,5 m³/s	3,5 m³/s	10,5 m³/s	0,0 m/s	0,0 m³/s			
	10 km/h	3,1 m³/s	7,0 m³/s	5,2 m³/s	7,0 m³/s	1,3 m/s	68,2 m³/s	10,3 %	10%	
	20 km/h	2,3 m³/s	6,2 m³/s	3,6 m³/s	6,2 m³/s	2,1 m/s	111,7 m³/s	5,5 %	6%	
	30 km/h	1,8 m³/s	5,9 m³/s	2,9 m³/s	5,9 m³/s	2,8 m/s	147,2 m³/s	4,0 %	4%	
	40 km/h	1,6 m³/s	5,7 m³/s	2,5 m³/s	5,7 m³/s	3,4 m/s	178,0 m³/s	3,2 %	3%	
	50 km/h	1,4 m³/s	5,4 m³/s	2,2 m³/s	5,4 m³/s	3,9 m/s	205,6 m³/s	2,6 %	3%	
	60 km/h	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,3 %	2%	
	70 km/h	1,2 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,8 m/s	254,4 m³/s	2,1 %	2%	
80 km/h	1,2 m³/s	5,3 m³/s	2,1 m³/s	5,3 m³/s	5,3 m/s	276,4 m³/s	1,9 %	2%		
90 km/h	1,2 m³/s	5,5 m³/s	2,2 m³/s	5,5 m³/s	5,7 m/s	297,2 m³/s	1,8 %	2%		
100 km/h	1,3 m³/s	5,6 m³/s	2,4 m³/s	5,6 m³/s	6,0 m/s	316,9 m³/s	1,8 %	2%		
Bauwerk	Tunnellänge									
	50 m	0,1 m³/s	0,3 m³/s	0,1 m³/s	0,3 m³/s	1,8 m/s	95,7 m³/s	0,3 %	0%	
	500 m	0,6 m³/s	2,6 m³/s	1,0 m³/s	2,6 m³/s	3,9 m/s	203,7 m³/s	1,3 %	1%	
	1.000 m	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,3 %	2%	
	1.500 m	1,9 m³/s	7,9 m³/s	3,0 m³/s	7,9 m³/s	4,6 m/s	243,1 m³/s	3,2 %	3%	
	2.000 m	2,5 m³/s	10,5 m³/s	4,0 m³/s	10,5 m³/s	4,8 m/s	250,1 m³/s	4,2 %		
	2.500 m	3,2 m³/s	13,2 m³/s	5,0 m³/s	13,2 m³/s	4,9 m/s	254,6 m³/s	5,2 %	5%	
	3.000 m	3,8 m³/s	15,8 m³/s	6,0 m³/s	15,8 m³/s	4,9 m/s	257,8 m³/s	6,1 %	6%	
	3.500 m	4,4 m³/s	18,4 m³/s	7,0 m³/s	18,4 m³/s	5,0 m/s	260,2 m³/s	7,1 %	7%	
	4.000 m	5,1 m³/s	21,1 m³/s	8,0 m³/s	21,1 m³/s	5,0 m/s	262,0 m³/s	8,0 %	8%	
	4.500 m	5,7 m³/s	23,7 m³/s	9,0 m³/s	23,7 m³/s	5,0 m/s	263,5 m³/s	9,0 %	9%	
	5.000 m	6,4 m³/s	26,3 m³/s	10,0 m³/s	26,3 m³/s	5,0 m/s	264,7 m³/s	9,9 %	10%	
	Tunnelquerschnitt									
	36,8 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,6 m/s	169,3 m³/s	3,1 %	3%	
	42,0 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,5 m/s	190,4 m³/s	2,8 %	3%	
	47,3 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,5 m/s	210,9 m³/s	2,5 %	2%	
	52,5 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,3 %	2%	
	57,8 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,3 m/s	250,4 m³/s	2,1 %	2%	
	63,0 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,3 m/s	269,4 m³/s	2,0 %	2%	
	68,3 m²	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,2 m/s	287,9 m³/s	1,8 %	2%	
	Steigung									
	-6 %	0,5 m³/s	3,7 m³/s	0,3 m³/s	3,7 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	1,6 %	2%	
	-4 %	0,7 m³/s	3,8 m³/s	0,3 m³/s	3,8 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	1,6 %	2%	
	-2 %	1,0 m³/s	4,1 m³/s	1,0 m³/s	4,1 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	1,8 %	2%	
	0 %	1,3 m³/s	5,3 m³/s	2,0 m³/s	5,3 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,3 %	2%	
2 %	1,8 m³/s	6,5 m³/s	3,6 m³/s	6,5 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	2,8 %	3%		
4 %	2,5 m³/s	7,8 m³/s	5,1 m³/s	7,8 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	3,4 %	3%		
6 %	3,8 m³/s	9,0 m³/s	6,7 m³/s	9,0 m³/s	4,4 m/s	230,9 m³/s	3,9 %	4%		

0% 25%

Untersuchung Ereignisfall

Die Untersuchungen für den Regelbetrieb haben gezeigt, dass eine Tunnellüftung unter üblichen Verkehrsverhältnissen nicht erforderlich ist. Die Dimensionierung der Lüftungsanlage ist deshalb ausschließlich durch den Ereignisfall geprägt. Zur Eingrenzung der Schnittstellen wird auch hier eine Bewertung der Einflussgrößen mit Hilfe einer Parameterstudie vorgenommen. Dazu wird auf den Referenztunnel aus Abbildung A.2.44 und den entsprechenden Parametern zurückgegriffen.

Die Berechnung der erforderlichen Schubkraft aus dem Brandereignis erfolgt mit dem vorab aufgezeigten Rechengang sowie den vorgegebenen Berechnungsgrößen. Die Ergebnisse der Parameterstudie zur Schubkraft sind in Tabelle A.2.17 und Tabelle A.2.18 zusammengefasst. Zur Einschätzung der Relevanz der einzelnen Parameter erfolgt eine Gegenüberstellung der jeweiligen Berechnungsergebnisse mit den Ergebnissen für den Referenztunnel.

Aus der erforderlichen Schubkraft wird im zweiten Schritt die Anzahl der Lüfter, durch Bestimmung der Schubkraft eines einzelnen Strahlventilators, ermittelt. Zur Bewertung der Einflussgrößen hinsichtlich der Lüfterart wird auf Standardgrößen für Lüfter (\varnothing 630 mm, bis \varnothing 1600 mm) und deren typischen Kennwerte zurückgegriffen.⁸⁷² Die zugehörigen Ergebnisse sind in Tabelle A.2.19 zusammengestellt. Auch hier erfolgt zur Bewertung der Parameteränderung eine Gegenüberstellung mit den Ergebnissen des Referenztunnels.

Tabelle A.2.16: Eingangsgrößen zur Berechnung der Schubkräfte aus Brand und Lüftung

Schub aus Brand			Schub Lüfter		
Tunnellänge	L	1.000 m	Standschub	S_N	700 N
Abstand Brand / Portal	L_{Brand}	500 m	Strahlgeschwindigkeit	u_v	33,1 m/s
Querschnitt	A	52,5 m ²	Durchmesser	\varnothing	1.000 mm
Umfang	U	27,8 m	Strömungsgeschwindigkeit	u_T	2,0 m/s
hydraulischer Durchmesser	D_h	7,6 m	Beiwert Wandverluste	k	1,15 -
Steigung	s	2,0 %			
Wandreibungskoeffizient	λ	0,015 -			
Verlustkoeffizient - Einströmen	ζ_E	0,3 -			
Verlustkoeffizient - Ausströmen	ζ_A	1,0 -			
Verkehrsgeschwindigkeit	v	0 km/h			
Verkehrsdichte Fahrstreifen 1	$D_{0,1}$	150 Kfz/km			
Verkehrsdichte Fahrstreifen 2	$D_{0,2}$	150 Kfz/km			
Anteil LKW	a_L	2,0 %			
Widerstandsfläche PKW	$c_w A_{\text{PKW}}$	0,9 m ²			
Widerstandsfläche LKW	$c_w A_{\text{LKW}}$	5,2 m ²			
Reduktionsfaktor für Stau	b	0,7 -			
Strömungsgeschwindigkeit	u_T	2,0 m/s			
Temperatur außen	T_a	15 °C			
Temperatur innen	T_i	25 °C			
Temperaturdifferenz Brand	ΔT_{Brand}	65 K			
Erdbeschleunigung	g	9,81 m/s ²			
Gaskonstante der Luft	RL	286,7 J/kg K			
Atmosphärischer Druck	ρ_{atm}	1013,25 hPa			
Windgeschwindigkeit Portal	u_{WA}	4,0 m/s			
Messhöhe	Z_{mess}	8 m			
Exponent für Wind	p	0,25 -			

max. Anzahl der Fahrzeuge bei stehendem Verkehr
max. Anzahl der Fahrzeuge bei stehendem Verkehr

unveränderliche Vorgaben

⁸⁷² An dieser Stelle wird auf eine vergleichbare Aufstellung in Tabelle 1, ASFINAG (2012)b, S. 39 verwiesen.

Tabelle A.2.17: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung der erforderlichen Schubkraft Teil 1 – Untersuchung Parameter – Bauwerk

	veränderliche Größe	Natürlicher Druck	Druckverlust durch Wandreibung	Druckverlust durch Fahrzeuge vor dem Brandherd	Auftrieb durch Brand	Winddriftüsse	Erforderlicher Schub	(Real-) Schub aus Lüftung	Anzahl Lüfter	Veränderung erforderlicher Schub	Veränderung Anzahl Lüfter	Veränderung erf. Schub	
		Δp_{nat}	Δp_R	Δp_F	Δp_B	Δp_{WV}	S_{erf}	S_R	$N_{Lüfter}$				
Bauwerk	Mustertunnel	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5				
	Tunnellänge												
	100 m	0,8 Pa	3,6 Pa	0,5 Pa	2,5 Pa	6,9 Pa	749 N	572 N	2	-72,8 %	-60 %	-73%	
	500 m	4,0 Pa	5,4 Pa	2,3 Pa	12,4 Pa	6,9 Pa	1.638 N	572 N	3	-40,4 %	-40 %	-40%	
	1000 m	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%	
	1500 m	12,1 Pa	10,1 Pa	7,0 Pa	37,3 Pa	6,9 Pa	3.861 N	572 N	7	40,4 %	40 %	40%	
	2000 m	16,2 Pa	12,5 Pa	9,4 Pa	49,7 Pa	6,9 Pa	4.972 N	572 N	9	80,9 %	80 %	81%	
	2500 m	20,2 Pa	14,9 Pa	11,7 Pa	62,2 Pa	6,9 Pa	6.083 N	572 N	11	121,3 %	120 %	121%	
	3000 m	24,2 Pa	17,2 Pa	14,0 Pa	74,6 Pa	6,9 Pa	7.195 N	572 N	13	161,7 %	160 %	162%	
	3500 m	28,3 Pa	19,6 Pa	16,4 Pa	87,1 Pa	6,9 Pa	8.306 N	572 N	15	202,1 %	200 %	202%	
	4000 m	32,3 Pa	21,9 Pa	18,7 Pa	99,5 Pa	6,9 Pa	9.418 N	572 N	17	242,6 %	240 %	243%	
	4500 m	36,4 Pa	24,3 Pa	21,0 Pa	111,9 Pa	6,9 Pa	10.529 N	572 N	19	283,0 %	280 %	283%	
	5000 m	40,4 Pa	26,6 Pa	23,4 Pa	124,4 Pa	6,9 Pa	11.640 N	572 N	21	323,4 %	320 %	323%	
	Abstand Brand - Portal												
	0 m	8,1 Pa	7,8 Pa	0,0 Pa	0,0 Pa	6,9 Pa	1.198 N	572 N	3	-56,4 %	-40 %	-56%	
	200 m	8,1 Pa	7,8 Pa	1,9 Pa	9,9 Pa	6,9 Pa	1.818 N	572 N	4	-33,9 %	-20 %	-34%	
	400 m	8,1 Pa	7,8 Pa	3,7 Pa	19,9 Pa	6,9 Pa	2.439 N	572 N	5	-11,3 %	0 %	-11%	
	500 m	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%	
	600 m	8,1 Pa	7,8 Pa	5,6 Pa	29,8 Pa	6,9 Pa	3.059 N	572 N	6	11,3 %	20 %	11%	
	800 m	8,1 Pa	7,8 Pa	7,5 Pa	39,8 Pa	6,9 Pa	3.680 N	572 N	7	33,9 %	40 %	34%	
	1000 m	8,1 Pa	7,8 Pa	9,4 Pa	49,7 Pa	6,9 Pa	4.301 N	572 N	8	56,4 %	60 %	56%	
	Tunnelquerschnitt												
	36,8 m ²	8,1 Pa	9,8 Pa	6,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.072 N	572 N	4	-24,6 %	-20 %	-25%	
	42,0 m ²	8,1 Pa	9,0 Pa	5,8 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.298 N	572 N	5	-16,4 %	0 %	-16%	
	47,3 m ²	8,1 Pa	8,3 Pa	5,2 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.524 N	572 N	5	-8,2 %	0 %	-8%	
	52,5 m ²	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%	
	57,8 m ²	8,1 Pa	7,4 Pa	4,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.975 N	572 N	6	8,2 %	20 %	8%	
	63,0 m ²	8,1 Pa	7,0 Pa	3,9 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	3.200 N	572 N	6	16,4 %	20 %	16%	
	68,3 m ²	8,1 Pa	6,7 Pa	3,6 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	3.426 N	572 N	6	24,6 %	20 %	25%	
	Tunnelumfang												
	19,5 m	8,1 Pa	6,4 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.675 N	572 N	5	-2,7 %	0 %	-3%	
	22,2 m	8,1 Pa	6,9 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.700 N	572 N	5	-1,8 %	0 %	-2%	
	25,0 m	8,1 Pa	7,3 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.724 N	572 N	5	-0,9 %	0 %	-1%	
	27,8 m	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%	
	30,6 m	8,1 Pa	8,3 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.774 N	572 N	5	0,9 %	0 %	1%	
	33,4 m	8,1 Pa	8,7 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.799 N	572 N	5	1,8 %	0 %	2%	
	36,1 m	8,1 Pa	9,2 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.823 N	572 N	5	2,7 %	0 %	3%	
	Steigung												
	0 %	0,0 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	0,0 Pa	6,9 Pa	1.019 N	572 N	2	-62,9 %	-60 %	-63%	
	2 %	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%	
4 %	16,2 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	49,7 Pa	6,9 Pa	4.479 N	572 N	8	62,9 %	60 %	63%		
6 %	24,2 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	74,6 Pa	6,9 Pa	6.209 N	572 N	11	125,9 %	120 %	126%		
Reibungsbeiwert													
0,010	8,1 Pa	6,2 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.667 N	572 N	5	-3,0 %	0 %	-3%		
0,013	8,1 Pa	7,0 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.708 N	572 N	5	-1,5 %	0 %	-1%		
0,015	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%		
0,018	8,1 Pa	8,6 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.790 N	572 N	5	1,5 %	0 %	1%		
0,020	8,1 Pa	9,4 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.832 N	572 N	5	3,0 %	0 %	3%		
0,023	8,1 Pa	10,1 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.873 N	572 N	6	4,5 %	20 %	4%		
0,025	8,1 Pa	10,9 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.914 N	572 N	6	6,0 %	20 %	6%		
Einlasswiderstand													
0,1	8,1 Pa	7,3 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.724 N	572 N	5	-0,9 %	0 %	-1%		
0,2	8,1 Pa	7,6 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.737 N	572 N	5	-0,5 %	0 %	0%		
0,3	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%		
0,4	8,1 Pa	8,0 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.762 N	572 N	5	0,5 %	0 %	0%		
0,5	8,1 Pa	8,3 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.774 N	572 N	5	0,9 %	0 %	1%		
0,6	8,1 Pa	8,5 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.787 N	572 N	5	1,4 %	0 %	1%		
0,7	8,1 Pa	8,7 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.799 N	572 N	5	1,8 %	0 %	2%		
0,8	8,1 Pa	9,0 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.811 N	572 N	5	2,3 %	0 %	2%		

-400% -200% 0% 200% 400%

Tabelle A.2.18: Ergebnisse der Parameterstudie zur Bestimmung der erforderlichen Schubkraft Teil 2 – Untersuchung Parameter – Sonstiges

veränderliche Größe	Natürlicher Druck	Druckverlust durch Wandreibung	Druckverlust durch Fahrzeuge vor dem Brandherd	Auftrieb durch Brand	Windöffnungen	Erforderlicher Schub	(Reat-) Schub aus Lüftung	Anzahl Lüfter	Veränderung erforderlicher Schub	Veränderung Anzahl Lüfter	Veränderung erf. Schub
	Δp_{nat}	Δp_R	Δp_F	Δp_B	Δp_{WV}	S_{erf}	S_R	$N_{Lüfter}$			
Mustertunnel	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5			
Strömungsgeschwindigkeit											
0,0 m/s	8,1 Pa	0,0 Pa	0,0 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.094 N	609 N	4	-23,8 %	-20 %	-24%
0,5 m/s	8,1 Pa	0,5 Pa	0,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.135 N	600 N	4	-22,3 %	-20 %	-22%
1,0 m/s	8,1 Pa	1,9 Pa	1,2 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.258 N	590 N	4	-17,9 %	-20 %	-18%
1,5 m/s	8,1 Pa	4,4 Pa	2,6 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.463 N	581 N	5	-10,4 %	0 %	-10%
2,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%
2,5 m/s	8,1 Pa	12,2 Pa	7,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	3.117 N	563 N	6	13,4 %	20 %	13%
3,0 m/s	8,1 Pa	17,5 Pa	10,5 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	3.568 N	554 N	7	29,8 %	40 %	39%
3,5 m/s	8,1 Pa	23,9 Pa	14,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	4.100 N	544 N	8	49,1 %	60 %	49%
4,0 m/s	8,1 Pa	31,2 Pa	18,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	4.713 N	535 N	9	71,4 %	80 %	71%
4,5 m/s	8,1 Pa	39,5 Pa	23,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	5.409 N	526 N	11	96,8 %	120 %	97%
5,0 m/s	8,1 Pa	48,7 Pa	29,2 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	6.186 N	517 N	12	125,0 %	140 %	125%
Windgeschwindigkeit Portal											
0,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	0,0 Pa	2.385 N	572 N	5	-13,3 %	0 %	-13%
1,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	0,4 Pa	2.407 N	572 N	5	-12,4 %	0 %	-12%
2,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	1,7 Pa	2.476 N	572 N	5	-9,9 %	0 %	-10%
3,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	3,9 Pa	2.590 N	572 N	5	-5,8 %	0 %	-6%
4,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%
5,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	10,8 Pa	2.954 N	572 N	6	7,5 %	20 %	7%
6,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	15,6 Pa	3.205 N	572 N	6	16,6 %	20 %	17%
7,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	21,3 Pa	3.501 N	572 N	7	27,3 %	40 %	27%
8,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	27,8 Pa	3.842 N	572 N	7	39,8 %	40 %	40%
Temperatur - außen											
0 °C	21,3 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	31,5 Pa	7,3 Pa	3.811 N	572 N	7	38,6 %	40 %	39%
5 °C	16,7 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	29,2 Pa	7,2 Pa	3.444 N	572 N	7	25,3 %	40 %	25%
10 °C	12,3 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	27,0 Pa	7,1 Pa	3.091 N	572 N	6	12,4 %	20 %	12%
15 °C	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%
20 °C	4,0 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	22,8 Pa	6,8 Pa	2.419 N	572 N	5	-12,0 %	0 %	-12%
25 °C	0,0 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	20,8 Pa	6,7 Pa	2.101 N	572 N	4	-23,6 %	-20 %	-24%
30 °C	-3,8 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	18,9 Pa	6,6 Pa	1.792 N	572 N	4	-34,8 %	-20 %	-35%
Temperatur - innen											
5 °C	-8,7 Pa	8,4 Pa	5,0 Pa	19,3 Pa	6,9 Pa	1.625 N	572 N	3	-40,9 %	-40 %	-41%
10 °C	-4,3 Pa	8,2 Pa	4,9 Pa	20,8 Pa	6,9 Pa	1.920 N	572 N	4	-30,2 %	-20 %	-30%
15 °C	0,0 Pa	8,1 Pa	4,8 Pa	22,2 Pa	6,9 Pa	2.206 N	572 N	4	-19,8 %	-20 %	-20%
20 °C	4,1 Pa	7,9 Pa	4,8 Pa	23,5 Pa	6,9 Pa	2.482 N	572 N	5	-9,7 %	0 %	-10%
25 °C	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%
30 °C	11,9 Pa	7,7 Pa	4,6 Pa	26,2 Pa	6,9 Pa	3.008 N	572 N	6	9,4 %	20 %	9%
35 °C	15,6 Pa	7,5 Pa	4,5 Pa	27,4 Pa	6,9 Pa	3.259 N	572 N	6	18,5 %	20 %	19%
Temperaturdifferenz - innen/Brand											
20 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	11,4 Pa	6,9 Pa	2.040 N	572 N	4	-25,8 %	-20 %	-26%
40 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	17,8 Pa	6,9 Pa	2.378 N	572 N	5	-13,5 %	0 %	-13%
60 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	23,5 Pa	6,9 Pa	2.679 N	572 N	5	-2,5 %	0 %	-3%
80 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	28,7 Pa	6,9 Pa	2.948 N	572 N	6	7,2 %	20 %	7%
100 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	33,3 Pa	6,9 Pa	3.190 N	572 N	6	16,0 %	20 %	16%
120 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	37,4 Pa	6,9 Pa	3.409 N	572 N	6	24,0 %	20 %	24%
140 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	41,2 Pa	6,9 Pa	3.608 N	572 N	7	31,2 %	40 %	31%
160 K	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	44,7 Pa	6,9 Pa	3.789 N	572 N	7	37,8 %	40 %	38%

-400% -200% 0% 200% 400%

Tabelle A.2.19: Ergebnisse der Parameterstudie zur Dimensionierung der Lüftungsanlage

veränderliche Größe	Natürlicher Druck	Druckverlust durch Wandreibung	Druckverlust durch Fahrzeuge vor dem Brandherd	Auftrieb durch Brand	Windeinflüsse	Erforderlicher Schub	(Real-) Schub aus Lüftung	Anzahl Lüfter	Veränderung (Real-) Schub	Veränderung Anzahl Lüfter	Veränderung (Real-) Schub
	Δp_{nat}	Δp_R	Δp_F	Δp_B	Δp_W	S_{erf}	S_R	$N_{Lüfter}$			
Mustertunnel											
-	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5			
gebräuchliche Strahlventilatorarten											
ø 630 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	454 N	7	-21 %	-21 %	-21%
ø 800 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	280 N	10	-51 %	-51 %	-51%
ø 900 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	484 N	6	-15 %	-15 %	-15%
ø 1000 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	773 N	4	35 %	35 %	35%
ø 1120 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	1.148 N	3	101 %	101 %	101%
ø 1400 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	1.174 N	3	105 %	105 %	105%
ø 1600 mm	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	1.455 N	2	154 %	154 %	154%
Strömungsgeschwindigkeit											
0,0 m/s	8,1 Pa	0,0 Pa	0,0 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.094 N	609 N	4	6,4 %	-20 %	6%
0,5 m/s	8,1 Pa	0,5 Pa	0,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.135 N	600 N	4	4,8 %	-20 %	5%
1,0 m/s	8,1 Pa	1,9 Pa	1,2 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.258 N	590 N	4	3,2 %	-20 %	3%
1,5 m/s	8,1 Pa	4,4 Pa	2,6 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.463 N	581 N	5	1,6 %	0 %	2%
2,0 m/s	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%
2,5 m/s	8,1 Pa	12,2 Pa	7,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	3.117 N	563 N	6	-1,6 %	20 %	-2%
3,0 m/s	8,1 Pa	17,5 Pa	10,5 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	3.568 N	554 N	7	-3,2 %	40 %	-3%
3,5 m/s	8,1 Pa	23,9 Pa	14,3 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	4.100 N	544 N	8	-4,8 %	60 %	-5%
4,0 m/s	8,1 Pa	31,2 Pa	18,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	4.713 N	535 N	9	-6,4 %	80 %	-6%
4,5 m/s	8,1 Pa	39,5 Pa	23,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	5.409 N	526 N	11	-8,0 %	120 %	-8%
5,0 m/s	8,1 Pa	48,7 Pa	29,2 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	6.186 N	517 N	12	-9,6 %	140 %	-10%
Beiwert für Wandverluste											
1,00	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	658 N	5	15,0 %	15 %	15%
1,05	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	626 N	5	9,5 %	10 %	10%
1,10	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	598 N	5	4,5 %	5 %	5%
1,15	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	572 N	5	0,0 %	0 %	0%
1,20	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	548 N	6	-4,2 %	-4 %	-4%
1,25	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	526 N	6	-8,0 %	-8 %	-8%
1,30	8,1 Pa	7,8 Pa	4,7 Pa	24,9 Pa	6,9 Pa	2.749 N	506 N	6	-11,5 %	-12 %	-12%

Festlegung der wesentlichen Schnittstellen

Mit Hilfe der vorgenommenen Parameterstudien lassen sich die wesentlichen Einflussgrößen identifizieren. Aus der Bestimmung der erforderlichen Schubkraft zeigt sich, dass die maßgebliche Schnittstelle die **Tunnellänge** darstellt. Dadurch bestimmt ist auch der Abstand zwischen Brandort und Tunnelportal. Dieser Zusammenhang ist auch aus dem Berechnungsgang abzuleiten. In allen Fällen – ausgenommen der Windeinwirkung am Portal – geht die Tunnellänge in die Berechnung der Schubkraft ein.

Da für die Bemessung immer nur der ungünstige Fall – Schubkraft entgegen der Gewichtskraft – maßgebend wird, ist neben der Tunnellänge, die vorhandene **Steigung** eine entscheidende Größe für die erforderlichen Schubkräfte. Zusätzlich gilt es die **Querschnittsfläche** des Tunnels als relevanten Parameter einzubeziehen. Weitere Einflussgrößen aus dem Bauwerk heraus, insbesondere hinsichtlich der Verluste (Oberfläche, Portalgestaltung), können an dieser Stelle vernachlässigt werden.

Aus den „Sonstigen Parametern“ zeigt sich, dass die vorherrschenden Strömungsgeschwindigkeiten erst ab ca. 3,0 m/s Luftgeschwindigkeit einen signifikanten Einfluss auf die erforderliche Schubkraft ausüben. Zusätzlich sollte die **Brandlast** für die verfolgte Zielstellung einbezogen werden. Alle weiteren „Sonstigen Parameter“ zeigen keine Relevanz.

Die Anzahl der Lüfter wird wesentlich durch den verwendeten **Ventilator**typ bestimmt. Davon abhängig ist auch der Energiebedarf. Verluste aus Wandreibung (Positionierung) und die vorherrschende Strömungsgeschwindigkeit hingegen können im Rahmen der angestrebten Zielstellung vernachlässigt werden.

Die **Anzahl der Lüfter** ist selbst eine entscheidende Größe – insbesondere für die Wartungs-, Inspektions-, Reinigungs- sowie Instandsetzungsarbeiten und gilt es als Einflussgröße aufzunehmen.

Für die Energiekosten ist zusätzlich zur **Betriebsdauer**, der **Energiepreis** relevant. Dabei ist neben dem Grundpreis auch der Leistungspreis entscheidend. Wie die Untersuchungen zeigen, ist die Lüftungsanlage ausschließlich im Ereignisfall zu betreiben. Das bedeutet allerdings, dass im Brandfall – mit Einsetzen des Lüftungsprogramms – der Energieverbrauch schlagartig ansteigt. Die verbaute Leistung von ca. 200 kW je Röhre wird dabei unmittelbar abgerufen. Die Folge sind sehr hohe Leistungsspitzen. Die bloße Bereitstellung der dafür erforderlichen Spannung ist dem Stromversorger häufig gesondert zu vergüten. Die entsprechenden Kosten müssen letztlich über einen erhöhten, allgemeingültigen Energiepreis in die Kostenplanung einbezogen werden.⁸⁷³

Für die Häufigkeit und Kosten der Erneuerung bzw. Modernisierung sind neben der jährlichen Betriebsdauer auch die Lebensdauer bzw. die geplante **Nutzungsdauer** der einzelnen Elemente bzw. der gesamten Lüftungsanlage entscheidend.

In Bezug auf die Wechselwirkung mit anderen Modulen und deren Prozesse lassen die gewonnenen Erkenntnisse der Parameterstudie nur eine Interdependenz zur **USV-Anlage** erkennen. Diese ist so zu dimensionieren, dass eine ausreichende Luftversorgung auch bei einem Stromausfall sichergestellt werden kann. Bei einem geringeren Leistungsbedarf der Lüftungsanlage könnte die USV-Anlage entsprechend kleiner dimensioniert werden. Weitere Schnittstellen zu anderen Modulen sind im Hinblick auf die Kosten nicht auszumachen.

A.2.3.1.9 Schnittstellen

Planung & Umsetzung:

Die Kosten für die Planung und den Einbau werden durch die erforderliche Leistungsfähigkeit und damit durch die Anzahl der Lüfter bestimmt. Wesentliche Größen hierzu sind die Tunnellänge, die lichte Querschnittsfläche sowie die vorhandene Längsneigung des Verkehrsweges. Für den vorliegenden Fall konzentriert sich die Dimensionierung der Lüfter ausschließlich auf den Ereignisfall. Die Gefährdungsklasse und damit die Brandlast gilt es somit als Schnittstellen zu berücksichtigen. Zusätzlich ist die Betriebsart (Gegen- oder Richtungsverkehr) sowie die Anzahl und Größe der gewählten Strahlventilatoren entscheidend.

Versorgung:

Für das vorliegende Tunnelbauwerk ist während des Regelbetriebes die natürliche Luftbewegung ausreichend. Dadurch beschränkt sich die Energieversorgung auf den Ereignisfall bzw. den Probetrieb und Fehlalarme. Die für die Systemleistung erforderlichen Schnittstellen aus der Umsetzung sind somit auch für die Versorgung maßgebend (Tunnellänge, Steigung, Betriebsart, Brandlast, Anzahl und Größe der Ventilatoren). Weitere Einflussgröße ist der Energiepreis, insbesondere der darin enthaltene Leistungspreis, der die Kosten zur Abdeckung der Leistungsspitzen beinhaltet.

⁸⁷³ vgl. MARNY (2012), S. 72 f.

Reinigung:

Die Kosten für die Reinigung der Lüftungsanlage werden maßgeblich durch die Anzahl der Ventilatoren und dem zeitlichen Aufwand für die Reinigungsarbeiten bestimmt. Die im Wartungsplan vorgesehenen Reinigungsintervalle fakturieren die Reinigungskosten über die jährliche Häufigkeit.

Inspektion:

Die Kosten für die Inspektion werden durch den zeitlichen Umfang der einzelnen Leistungen geprägt. Art und Häufigkeit sind durch gesetzliche, normative bzw. betreiber-spezifische Regelungen vorgegeben (Instandhaltungsstrategie).

Wartung:

Die für die Wartung anfallenden Kosten werden durch den zeitlichen Aufwand sowie die notwendigen Betriebsstoffe bestimmt. Die Häufigkeit der Wartungsarbeiten wird durch die geplante Instandhaltungsstrategie vorgegeben.

Instandsetzung:

Die Ausfallrate der Lüfter bzw. der Sensorik und damit einhergehend die Häufigkeit von Reparatur bzw. Austausch bestimmen ebenso wie der dafür notwendige Zeitaufwand die Instandsetzungskosten. Dabei entscheidend ist auch die vorgesehene Instandhaltungsstrategie.

Erneuerung:

Die Schnittstellen für die Kosten zur Erneuerung der Lüftungsanlage sind identisch mit den Schnittstellen für die Planung und Umsetzung in der Herstellungsphase. Die Häufigkeit ist geprägt durch den Erneuerungszyklus und hängt von der Lebensdauer bzw. geplanten Nutzungsdauer (Instandhaltungsstrategie) der Ventilatoren bzw. der Sensoren ab.

A.3 Kostenkalkulation der Teilleistungen für den Mustertunnel

Zur Bestimmung der Kosten wird, soweit möglich, auf vorhandene Ausschreibungsunterlagen vergleichbarer Projekte zurückgegriffen. Die erhobenen Einheitspreise werden auf das Bezugszeitpunkt 2014 umgerechnet und zu einer mittleren Größe zusammengeführt. Mit den daraus gewonnenen neuen Einheitspreisen wird eine vollständige Kalkulation der Leistungen vorgenommen.⁸⁷⁴

Die Planungskosten werden auf Basis der deutschen Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) in der Fassung vom 10.07.2013 abgeschätzt.⁸⁷⁵

Die Kosten für Fahrzeuge und Geräte werden auf Basis der Österreichischen Baugeräteleiste (ÖBGL), Ausschreibungsunterlagen bzw. eigenen Abschätzungen erhoben.⁸⁷⁶

Die angesetzten Löhne beziehen sich auf das Merkblatt der Ingenieurkammer Baden-Württemberg sowie eigenen Erfahrungswerten (Tabelle A.3.20).⁸⁷⁷

Für Leistungen, die nicht aus realen Bauwerken abgebildet werden können, wird im ersten Schritt eine Literaturrecherche vorgenommen um veröffentlichte Größen (Kosten, Kalkulationsansätze, Mengensätze, Aufwandswerte usw.) zur Bestimmung der Kosten herauszuarbeiten. Für eine Vielzahl an Leistungen liegt allerdings keine validierte Datenbasis vor. In diesen Fällen wird zur Bestimmung der Kosten eine Abschätzung von Leistungsumfang und Kosten vorgenommen.

Bei den nachfolgenden Kalkulationen handelt es sich um eine projektspezifische Abschätzung der Kosten für die einzelnen Teilleistungen. Die berechneten Kostengrößen sollen dazu dienen, die Anwendbarkeit und Funktionalität des entwickelten Modells und der zugehörigen Methodik zu belegen. Die berechneten Ergebnisse sind dabei von ungeordneter Relevanz.

Tabelle A.3.20: Gerätekosten und Stundenlöhne zur Kalkulation der Kosten

Gerätekosten		Stundenlöhne	
LKW-Vorsprühen	45,00 €/h	Arbeiter	45,00 €/h
LKW-Reinigungsaufsatz	85,00 €/h	Techniker	50,00 €/h
LKW-Entsorgung	60,00 €/h	Ingenieur (Verwaltung)	60,00 €/h
Hubsteiger	36,00 €/h	Ingenieur (Büro/Firma)	70,00 €/h
Kran/Teleskoplader	33,00 €/h	Mittellohn für Inspektion	55,00 €/h
Kleintransporter inkl. Kleingeräte	30,00 €/h		
Kleintransporter mit Werkzeug	20,00 €/h		
Kleinbus	12,50 €/h		
PKW	10,00 €/h		
Hochdruckreiniger	3,00 €/h		
Messgeräte - Inspektion-Beleuchtung	12,00 €/h		
Messtechnik - Wartung-Beleuchtung	20,00 €/h		
Messgeräte - Inspektion-Lüftung	8,00 €/h		
Messgeräte - Inspektion-Lüftung Prüf.	15,00 €/h		

Zur Kalkulation der Leistungen wurden beide Tunnelröhren einbezogen.

Als Bezugszeitpunkt für die Kosten wird das Jahr 2014 festgelegt.

⁸⁷⁴ Die vorliegenden Ausschreibungsunterlagen unterliegen einer Sperrklausel und dürfen an dieser Stelle nicht veröffentlicht werden.

⁸⁷⁵ vgl. HOAI (2013)

⁸⁷⁶ vgl. ÖBGL (2009)

⁸⁷⁷ vgl. INGBW (2013)

A.3.1 Modul Gewölbe

A.3.1.1 Gewölbe – Planung

Gewölbe - Planung							
Planung	Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Honorar- zone	Honorar- satz	Leistungs- phasen	Neben- kosten	Honorar
Objektplanung (§44)	10.450.000 €	20 %	IV	mindest	2 - 9	5 %	490.000,00 €
Tragwerksplanung (§52)	10.450.000 €	15 %	II	viertel	2 - 5	5 %	530.000,00 €
Summe Planung							1.020.000,00 €
Prüfung Tragwerksplanung			Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Klasse	Honorar	
Planungsprüfung			10.450.000 €	15 %	4	300.000,00 €	
Summe Prüfung							300.000,00 €
Verwaltung		Anzahl	Dauer	Verdienst	Gemeinkosten- zuschlag	Kosten	
Projektleiter		0,5 AK	2,00 a	60.000 €/a	20 %	72.000,00 €	
Sachbearbeiter		2,5 AK	2,00 a	50.000 €/a	20 %	300.000,00 €	
Summe Verwaltung							372.000,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Planung							1.692.000,00 €

* Zur Berücksichtigung, dass es sich hier lediglich um Teilleistungen zur Gesamtplanung handelt.

A.3.1.2 Gewölbe – Umsetzung

Gewölbe - Umsetzung			
Leistung	Menge	EP	Kosten
Herstellung Gewölbe	34.080 m³	227,00 €/m³	7.736.160,00 €
Baustelleneinrichtung	1 psch.	190.000,00 €	190.000,00 €
BE Vorhaltung	18 Mo.	140.000,00 €/Mo	2.520.000,00 €
Summe Umsetzung			10.446.160,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Umsetzung			10.446.160,00 €

A.3.1.3 Gewölbe – Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)

Gewölbe - Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)						
Dauer	Wandhöhe	Arbeitsgeschw.	Tunnellänge	Anzahl	Zuschlag	Dauer
Vorsprühen	3,0 m	8,0 km/h	2,4 km	4,0		1,2 h
Reinigung (LKW)	3,0 m	1,0 km/h	2,4 km	4,0	20,0 %	11,5 h
Reinigung (händisch)					psch.	10,0 h
Entsorgung					psch.	3,0 h
Sonstiges					psch.	4,0 h
Kosten Gerät				Dauer	EP	Kosten
LKW - Vorsprühen				1,2 h	45,00 €/h	54,00 €
LKW - Reinigung				11,5 h	85,00 €/h	977,50 €
Hochdruckreiniger				10,0 h	3,00 €/h	30,00 €
LKW - Entsorgung				3,0 h	60,00 €/h	180,00 €
Summe Gerät						1.241,50 €
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Vorsprühen		1 AK	1,2 h	1,2 h	45,00 €/h	54,00 €
Reinigung (LKW)		2 AK	11,5 h	23,0 h	45,00 €/h	1.035,00 €
Reinigung (händisch)		2 AK	10,0 h	20,0 h	45,00 €/h	900,00 €
Entsorgung		2 AK	3,0 h	6,0 h	45,00 €/h	270,00 €
Sonstige Arbeiten		3 AK	4,0 h	12,0 h	45,00 €/h	540,00 €
Summe Personal						2.799,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Reinigungsmittel					psch.	1.000,00 €
Frischwasser (LKW)		120 l/min	9,6 h	69 m ³	2,00 €/m ³	138,00 €
Frischwasser (händisch)				3 m ³	2,00 €/m ³	6,00 €
Schmutzwasser				72 m ³	3,00 €/m ³	216,00 €
Verkehrssicherung					psch.	500,00 €
Summe Material / Sonstiges						1.860,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)						5.900,50 €

A.3.1.4 Gewölbe – Reinigung (Gewölbe komplett)

Gewölbe - Reinigung (Gewölbe komplett)						
Dauer	Wandhöhe	Arbeitsgeschw.	Tunnellänge	Anzahl	Zuschlag	Dauer
Vorsprühen - Wände	3,0 m	8,0 km/h	2,4 km	4,0		1,2 h
Reinigung (LKW) - Wände	3,0 m	1,0 km/h	2,4 km	4,0	20,0 %	11,5 h
Vorsprühen - Gewölbe	12,2 m	8,0 km/h	2,4 km	2,0	10,0 %	2,7 h
Reinigung (LKW) - Gewölbe	12,2 m	1,0 km/h	2,4 km	2,0	20,0 %	23,4 h
Reinigung (händisch)					psch.	20,0 h
Entsorgung					psch.	5,0 h
Sonstiges					psch.	6,0 h
Kosten Gerät				Dauer	EP	Kosten
LKW - Vorsprühen				4,0 h	45,00 €/h	180,00 €
LKW - Reinigung				35,0 h	85,00 €/h	2.975,00 €
Hochdruckreiniger				20,0 h	3,00 €/h	60,00 €
LKW - Entsorgung				5,0 h	60,00 €/h	300,00 €
Summe Gerät						3.515,00 €
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Vorsprühen		1 AK	4,0 h	4,0 h	45,00 €/h	180,00 €
Reinigung (LKW)		2 AK	35,0 h	70,0 h	45,00 €/h	3.150,00 €
Reinigung (händisch)		2 AK	20,0 h	40,0 h	45,00 €/h	1.800,00 €
Entsorgung		2 AK	5,0 h	10,0 h	45,00 €/h	450,00 €
Sonstige Arbeiten		3 AK	6,0 h	18,0 h	45,00 €/h	810,00 €
Summe Personal						6.390,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Reinigungsmittel					psch.	1.500,00 €
Frischwasser (LKW)		120 l/min	35,0 h	252 m³	2,00 €/m³	504,00 €
Frischwasser (händisch)				5 m³	2,00 €/m³	10,00 €
Schmutzwasser				257 m³	3,00 €/m³	771,00 €
Verkehrssicherung					psch.	750,00 €
Summe Material / Sonstiges						3.535,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Reinigung (Gewölbe komplett)						13.440,00 €

A.3.1.5 Gewölbe – Inspektion (Laufende Überwachung)

Gewölbe - Inspektion (Laufende Überwachung)						
Vorbereitung		Dauer	Lohn	Kosten		
Sonstiges		psch.	0,5 h	45,00 €/h	22,50 €	
Summe Personal Vorbereitung						22,50 €
Laufende Überwachung		Strecke	Geschwindigkeit	Dauer	Lohn	Kosten
Sichtprüfung		4.800 m	5,0 km/h	1,0 h	45,00 €/h	45,00 €
Sonstige Prüfung				0,5 h	45,00 €/h	22,50 €
Summe Personal Bauwerksprüfung						67,50 €
Nachbereitung		Dauer	Lohn	Kosten		
Sonstiges		psch.	0,5 h	45,00 €/h	22,50 €	
Summe Personal Nachbereitung						22,50 €
Geräte		Dauer	EP	Kosten		
Kleinbus		1,0 h	12,50 €/h	12,50 €		
Sonstiges				50,00 €		
Summe Gerät						62,50 €
Gesamtkosten Gewölbe - Inspektion (Laufende Überwachung)						175,00 €

A.3.1.6 Gewölbe – Inspektion (Kontrolle)

Gewölbe - Inspektion (Kontrolle)				
Kontrolle				
Aufwandsabschätzung gem. RVS 06.02.32 $H_A = F_A \times H_0 \times t \times u$				
Abrechnungsfläche F_A		18,2 m ² /m	4.800 m	87.360 m ²
Grundwert H_0				0,0115 h/m ²
Teilleistung Bearbeitung t	parallele Röhre +0,8 ohne Ulmendrainage -0,04			1,76
Zustandsfaktor u	ausreichend			0,80
Aufwand für Kontrolle	1/3 des Aufwandes der Prüfung [Tathoff, Neuß (2002)]			472,0 h
Bauwerkskontrolle				
		Dauer	Lohn	Kosten
Fahrzeiten/Rüstzeiten	pauschal	15,0 h	55,00 €/h	825,00 €
Bauwerksprüfung		472,0 h	55,00 €/h	25.960,00 €
Verwaltungsaufwand	Abschätzung 20%	97,4 h	55,00 €/h	5.357,00 €
Summe Personal Bauwerksprüfung				32.142,00 €
Geräte				
		Dauer	EP	Kosten
Kleintransporter mit Werkzeug		60,0 h	20,00 €/h	1.200,00 €
Verkehrssicherung			psch.	2.000,00 €
Sonstiges			psch.	200,00 €
Summe Gerät				3.400,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Inspektion (Kontrolle)				35.542,00 €

A.3.1.7 Gewölbe – Inspektion (Prüfung)

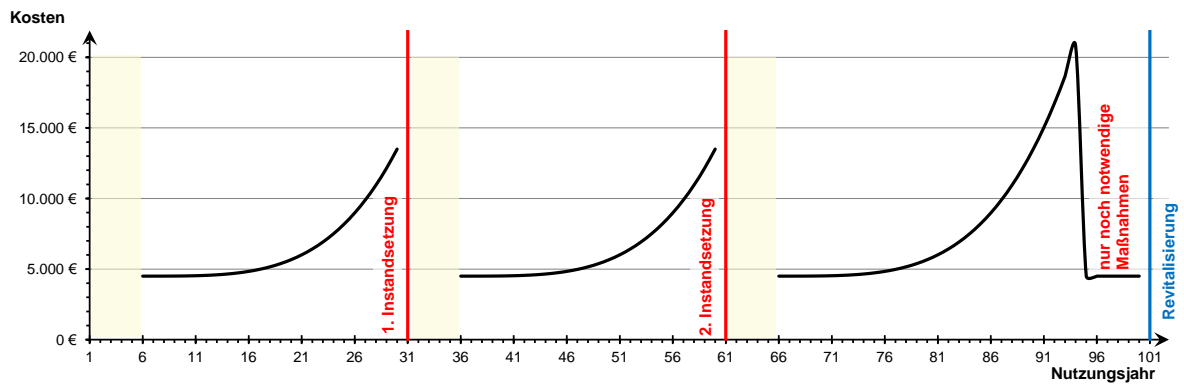
Gewölbe - Inspektion (Prüfung)				
Bauwerksprüfung				
Aufwandsabschätzung gem. RVS 06.02.32 $H_A = F_A \times H_0 \times t \times u$				
Abrechnungsfläche F_A		18,2 m ² /m	4.800 m	87.360 m ²
Grundwert H_0				0,0115 h/m ²
Teilleistung Bearbeitung t	parallele Röhre +0,8 ohne Ulmendrainage -0,04			1,76
Zustandsfaktor u	ausreichend			0,80
Aufwand für Bauwerksprüfung				1415,0 h
Bauwerksprüfung				
		Dauer	Lohn	Kosten
Fahrzeiten/Rüstzeiten	pauschal	20,0 h	55,00 €/h	1.100,00 €
Bauwerksprüfung		1.415,0 h	55,00 €/h	77.825,00 €
Verwaltungsaufwand	Abschätzung 20%	287,0 h	55,00 €/h	15.785,00 €
Summe Personal Bauwerksprüfung				94.710,00 €
Geräte				
		Dauer	EP	Kosten
PKW		120,0 h	10,00 €/h	1.200,00 €
Kleintransporter inkl. Kleingeräte		120,0 h	30,00 €/h	3.600,00 €
Hubsteiger		120,0 h	36,00 €/h	4.320,00 €
Gerüst			psch.	1.500,00 €
Verkehrssicherung			psch.	10.000,00 €
Sonstiges			psch.	500,00 €
Summe Gerät				21.120,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Inspektion (Prüfung)				115.830,00 €

A.3.1.8 Gewölbe – Wartung

Gewölbe - Wartung					
Personal		Dauer	Lohn	Kosten	
Planung / Vorbereitung	psch.	20,0 h	60,00 €/h	1.200,00 €	
Umsetzung	psch.	40,0 h	45,00 €/h	1.800,00 €	
				Summe Personal	3.000,00 €
Gerät			Kosten		
Klein-LKW			psch.	500,00 €	
Werkzeug			psch.	200,00 €	
				Summe Gerät	700,00 €
Material			Kosten		
Material			psch.	500,00 €	
Sonstiges			psch.	300,00 €	
				Summe Material	800,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Wartung*					4.500,00 €

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Instandsetzung.

Verlauf der Wartungskosten über den gesamten Lebenszyklus



A.3.1.9 Gewölbe – 1. Instandsetzung

Gewölbe - 1. Instandsetzung				
Instandsetzungsfläche	Anteil	Breite	Länge	Menge
Instandsetzungsfläche	25,0 %	3,0 m	2.400 m	7.200,0 m ² (Anteil an Betonfläche bis 3 m Wandhöhe)
Schadhafte Betonfläche	4,0 %	18,2 m	2.400 m	3.494,0 m ² (Anteil an schadhafter Betonfläche - Bewehr.)
Bewehrungslänge	25,0 %		15 lfm/m ²	13.103,0 lfm (Anteil an schadhafter Bewehrung)
Baupreissteigerung (2004-2014)		23,5 % (gem. Statistik Austria - Brückenbau)		
Instandsetzungsarbeiten	Menge	EP (2004)	EP (2014)	Kosten
Lokalisieren Schadstellen	7.200,0 m ²	1,50 €/m ²	1,90 €/m ²	13.680,00 €
Betonabtrag HDW	7.200,0 m ²	15,50 €/m ²	19,20 €/m ²	138.240,00 €
Bewehrung freilegen	3.494,0 m ²	23,00 €/m ²	28,50 €/m ²	99.579,00 €
Bewehrung aufbereiten	13.103,0 lfm	13,00 €/lfm	16,10 €/lfm	210.958,30 €
Reprofilierung Beton	10.694,0 m ²	153,00 €/m ²	189,00 €/m ²	2.021.166,00 €
Gerüst	10.694,0 m ²	3,50 €/m ²	4,40 €/m ²	47.053,60 €
Verkehrssicherung			psch.	15.000,00 €
Baustelleneinrichtung			psch.	150.000,00 €
Summe Instandsetzungsarbeiten				2.695.676,90 €
Planung				Kosten
Planungskosten inkl. TWP			psch.	125.000,00 €
Verwaltungskosten			psch.	125.000,00 €
Summe Planung				250.000,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - 1. Instandsetzung				2.945.676,90 €

A.3.1.10 Gewölbe – 2. Instandsetzung

Gewölbe - 2. Instandsetzung				
Instandsetzungsfläche	Anteil	Breite	Länge	Menge
Instandsetzungsfläche	50,0 %	3,0 m	2.400 m	14.400,0 m ² (Anteil an Betonfläche bis 3 m Wandhöhe)
Schadhafte Betonfläche	8,0 %	18,2 m	2.400 m	6.989,0 m ² (Anteil an schadhafter Betonfläche - Bewehr.)
Bewehrungslänge	40,0 %		15 lfm/m ²	41.934,0 lfm (Anteil an schadhafter Bewehrung)
Baupreissteigerung (2004-2014)		23,5 % (gem. Statistik Austria - Brückenbau)		
Instandsetzungsarbeiten	Menge	EP (2004)	EP (2014)	Kosten
Lokalisieren Schadstellen	14.400,0 m ²	1,50 €/m ²	1,90 €/m ²	27.360,00 €
Betonabtrag HDW	14.400,0 m ²	15,50 €/m ²	19,20 €/m ²	276.480,00 €
Bewehrung freilegen	6.989,0 m ²	23,00 €/m ²	28,50 €/m ²	199.186,50 €
Bewehrung aufbereiten	41.934,0 lfm	13,00 €/lfm	16,10 €/lfm	675.137,40 €
Reprofilierung Beton	21.389,0 m ²	153,00 €/m ²	189,00 €/m ²	4.042.521,00 €
Gerüst	21.389,0 m ²	3,50 €/m ²	4,40 €/m ²	94.111,60 €
Verkehrssicherung			psch.	25.000,00 €
Baustelleneinrichtung			psch.	250.000,00 €
Summe Instandsetzungsarbeiten				5.589.796,50 €
Planung				Kosten
Planungskosten inkl. TWP			psch.	300.000,00 €
Verwaltungskosten			psch.	250.000,00 €
Summe Planung				550.000,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - 2. Instandsetzung				6.139.796,50 €

A.3.2 Modul Sohle

A.3.2.1 Sohle – Planung

Sohle - Planung							
Planung	Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Honorar- zone	Honorar- satz	Leistungs- phasen	Neben- kosten	Honorar
Objektplanung (§44)	11.000.000 €	20 %	IV	mindest	2 - 9	5 %	510.000,00 €
Tragwerksplanung (§52)	11.000.000 €	15 %	II	viertel	2 - 5	5 %	550.000,00 €
Summe Planung							1.060.000,00 €
Prüfung Tragwerksplanung			Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Klasse	Honorar	
Planungsprüfung			11.000.000 €	15 %	4	310.000,00 €	
Summe Prüfung							310.000,00 €
Verwaltung		Anzahl	Dauer	Verdienst	Gemeinkosten- zuschlag	Kosten	
Projektleiter		0,5 AK	2,00 a	60.000 €/a	20 %	72.000,00 €	
Sachbearbeiter		2,5 AK	2,00 a	50.000 €/a	20 %	300.000,00 €	
Summe Verwaltung							372.000,00 €
Gesamtkosten Sohle - Planung							1.742.000,00 €

* Zur Berücksichtigung, dass es sich hier lediglich um Teilleistungen zur Gesamtplanung handelt.

A.3.2.2 Sohle – Umsetzung

Sohle - Umsetzung			
Leistung	Menge	EP	Kosten
Herstellung Sohlbalken	12.000 m³	262,00 €/m³	3.144.000,00 €
Herstellung Sohlgewölbe	27.360 m³	218,00 €/m³	5.964.480,00 €
Baustelleneinrichtung	1 psch.	165.000,00 €	165.000,00 €
BE Vorhaltung	18 Mo.	98.000,00 €/Mo	1.764.000,00 €
Summe Umsetzung			11.037.480,00 €
Gesamtkosten Sohle - Umsetzung			11.037.480,00 €

A.3.3 Modul Einfahrtsbeleuchtung

A.3.3.1 Einfahrtsbeleuchtung – Planung

Einfahrtsbeleuchtung - Planung							
Planungskosten	Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Honorar- zone	Honorar- satz	Leistungs- phasen	Neben- kosten	Honorar
Objektplanung (§44)	320.000 €	20 %	IV	mindest	2 - 9	5 %	33.000,00 €
Techn. Ausrüstung (§56)	320.000 €	20 %	II	mittel	3 - 9	5 %	57.000,00 €
Summe Planung							90.000,00 €
Verwaltung		Anzahl	Dauer	Verdienst	Gemeinkosten- zuschlag	Kosten	
Projektleiter		0,5 AK	0,75 a	60.000 €/a	20 %	27.000,00 €	
Sachbearbeiter		1,0 AK	0,75 a	50.000 €/a	20 %	45.000,00 €	
Summe Verwaltung							72.000,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Planung							162.000,00 €

* Zur Berücksichtigung, dass es sich hier lediglich um Teilleistungen zur Gesamtplanung handelt.

A.3.3.2 Einfahrtsbeleuchtung – Umsetzung

Einfahrtsbeleuchtung - Umsetzung			
Leuchten	Menge	EP	Kosten
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, asymmetrisch	124 Stck.	477,00 €/Stck.	59.148,00 €
Spezialtunnelleuchte 250 W, einflammig, asymmetrisch	48 Stck.	481,00 €/Stck.	23.088,00 €
Spezialtunnelleuchte 400 W, einflammig, asymmetrisch	160 Stck.	496,00 €/Stck.	79.360,00 €
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W	124 Stck.	15,00 €/Stck.	1.860,00 €
Natriumdampf-Hochdrucklampen 250 W	48 Stck.	17,00 €/Stck.	816,00 €
Natriumdampf-Hochdrucklampen 400 W	160 Stck.	18,00 €/Stck.	2.880,00 €
Summe Leuchten			167.152,00 €
Verkabelung	Menge	EP	Kosten
Kabel N2XH-J	18.000 m	4,40 €/lfm	79.200,00 €
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung	1.000 m	37,00 €/lfm	37.000,00 €
Summe Verkabelung			116.200,00 €
Sensorik	Menge	EP	Kosten
Sensor Außenleuchtdichte L20	2 Stck.	3.850,00 €/Stck.	7.700,00 €
Sensor Leuchtdichte Einsichtstrecke	4 Stck.	2.750,00 €/Stck.	11.000,00 €
Summe Sensorik			18.700,00 €
Sonstiges			Kosten
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges	psch.		15.000,00 €
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.	psch.		3.000,00 €
Summe Sonstiges			18.000,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Umsetzung			320.052,00 €

A.3.3.3 Einfahrtsbeleuchtung – Versorgung

Einfahrtsbeleuchtung - Versorgung										
Betriebsstunden in den einzelnen Schaltstufen pro Jahr [in Anlehnung an Hopferwieser (1977)]										(Nacht)
Stufe	100 %	87,5 %	75 %	62,5 %	50 %	37,5 %	25 %	12,5 %	0,0 %	Summe
Betriebsstunden	600 h	450 h	400 h	450 h	600 h	500 h	700 h	680 h	4.380 h	8.760 h
Äquivalente Betriebsstunden unter Volllast	600 h	394 h	300 h	281 h	300 h	188 h	175 h	85 h	0 h	2.323 h
Leuchten		HST 150		HST 250		HST 400		Systemleistung Volllast		
Leistungsaufnahme Leuchte (max.)		150 W		250 W		400 W				
Verlustleistung Vorschaltgerät (VVG)		26 W		35 W		46 W				
Leuchtenanzahl		124 Stck.		48 Stck.		160 Stck.				
Leistungsaufnahme - Volllast		21,8 kW		13,7 kW		71,4 kW		106,9 kW		
Energiekosten Leuchten	Systemleistung Volllast	äquiv. Betriebsstunden Volllast	jährlicher Energieverbrauch		Energiepreis	Kosten				
	106,9 kW	2.323 h	248.245 kWh		0,11 €/kWh	27.307,00 €				
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten			
Außenleuchtdichte L20	8.760 h	2 Stck.	50 W	100 W	876 kWh	0,11 €/kWh	96,36 €			
Leuchtdichte Einsichtstrecke	8.760 h	4 Stck.	50 W	200 W	1.752 kWh	0,11 €/kWh	192,72 €			
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Versorgung									27.596,08 €	

A.3.3.4 Einfahrtsbeleuchtung – Reinigung

Einfahrtsbeleuchtung - Reinigung					
Dauer	Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer		
Reinigung Leuchten	30 Sek./Stck.	332 Stck.	2,8 h		
Sonstiges		psch.	1,0 h		
Kosten Gerät	Dauer	EP	Kosten		
LKW - Reinigung	2,8 h	85,00 €/h	238,00 €		
Summe Gerät			238,00 €		
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Reinigung (LKW)	1 AK	2,8 h	2,8 h	45,00 €/h	126,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	1,0 h	2,0 h	45,00 €/h	90,00 €
Summe Personal					216,00 €
Kosten Material	Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Wasser inkl. Entsorgung	50 l/min	2,8 h	8,4 m³	5,00 €/m³	42,00 €
Summe Material					42,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Reinigung					496,00 €

A.3.3.5 Einfahrtsbeleuchtung – Inspektion (Kontrolle)

Einfahrtsbeleuchtung - Inspektion (Kontrolle)					
Leistungen - Kontrolle (jährlich)		Aufwand	Anzahl	Dauer	
Funktionskontrolle Leuchten + Unterkonstruktion		2,0 h/Röhre	2 Röhren	4,0 h	
Funktionskontrolle Verkabelung		1,0 h/Röhre	2 Röhren	2,0 h	
Funktionskontrolle Sensorik		0,5 h/Sensor	6 Sensoren	3,0 h	
Kontrolle Lichtausbeute, Leuchtdichtemessung, Regelung		1,5 h/Röhre	2 Röhren	3,0 h	
Sonstiges			psch.	1,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
PKW		8,0 h	10,00 €/h	80,00 €	
Hubsteiger		2,0 h	36,00 €/h	72,00 €	
Messgeräte		2,0 h	12,00 €/h	24,00 €	
				Summe Gerät	176,00 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Funktionskontrolle Leuchten + UK	2 AK	4,0 h	8,0 h	50,00 €/h	400,00 €
Funktionskontrolle Verkabelung	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
Funktionskontrolle Sensorik	2 AK	3,0 h	6,0 h	50,00 €/h	300,00 €
Kontrolle Lichtausbeute usw.	2 AK	3,0 h	6,0 h	50,00 €/h	300,00 €
Sonstiges	2 AK	1,0 h	2,0 h	50,00 €/h	100,00 €
				Summe Personal	1.300,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Inspektion (Kontrolle)					1.476,00 €

A.3.3.6 Einfahrtsbeleuchtung – Inspektion (Prüfung)

Einfahrtsbeleuchtung - Inspektion (Prüfung)					
Zusätzliche Leistungen - Prüfung (alle 3 Jahre)		Aufwand	Anzahl	Gesamtdauer	
Prüfung Sensorik		1,0 h/Sensor	6 Sensoren	6,0 h	
Prüfung Verkabelung		2,0 h/Röhre	2 Röhren	4,0 h	
Prüfung Unterkonstruktion		2,0 h/Röhre	2 Röhren	4,0 h	
Zusatzkosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
PKW		8,0 h	10,00 €/h	80,00 €	
Hubsteiger		4,0 h	36,00 €/h	144,00 €	
Messgeräte		6,0 h	12,00 €/h	72,00 €	
				Summe Gerät	296,00 €
Zusatzkosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Prüfung und Kalibrierung Sensorik	2 AK	6,0 h	12,0 h	50,00 €/h	600,00 €
Prüfung Verkabelung	2 AK	4,0 h	8,0 h	50,00 €/h	400,00 €
Prüfung Unterkonstruktion	2 AK	4,0 h	8,0 h	50,00 €/h	400,00 €
				Summe Personal	1.400,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Inspektion (Prüfung)					1.696,00 €

A.3.3.7 Einfahrtsbeleuchtung – Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)

Einfahrtsbeleuchtung - Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)						
Dauer		Aufwand	Anzahl Röhren	Dauer		
Kalibrierung Leuchtdichte, inkl. Sensorik		4 h/Röhre	2 Stck.	8,0 h		
Sonstiges				1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Messtechnik		8,0 h	20,00 €/h	160,00 €		
PKW		9,0 h	10,00 €/h	90,00 €		
				Summe Gerät	250,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Kalibrierung	2 AK	8,0 h	16,0 h	50,00 €/h	800,00 €	
Sonstige Arbeiten	1 AK	1,0 h	1,0 h	50,00 €/h	50,00 €	
				Summe Personal	850,00 €	
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)						1.100,00 €

A.3.3.8 Einfahrtsbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel)

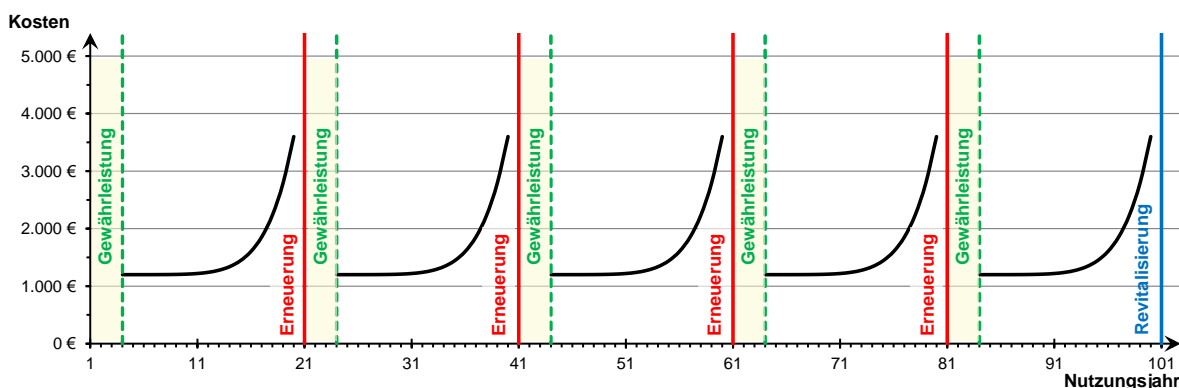
Einfahrtsbeleuchtung - Wartung (Austausch Leuchtmittel)						
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer		
planmäßiger Austausch Leuchtmittel		10 min./Stck.	332 Stck.	55,0 h		
Innenreinigung Leuchte		5 min./Stck.	332 Stck.	28,0 h		
Sonstiges			psch.	2,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		85,0 h	36,00 €/h	3.060,00 €		
Kleintransporter		85,0 h	12,50 €/h	1.062,50 €		
				Summe Gerät	4.122,50 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Leuchtmitteltausch	2 AK	83,0 h	166,0 h	50,00 €/h	8.300,00 €	
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
				Summe Personal	8.500,00 €	
Kosten Material / Sonstiges		Menge	EP	Kosten		
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		124 Stck.	16,00 €/Stck.	1.984,00 €		
Natriumdampf-Hochdrucklampen 250 W		48 Stck.	18,00 €/Stck.	864,00 €		
Natriumdampf-Hochdrucklampen 400 W		160 Stck.	19,00 €/Stck.	3.040,00 €		
Kleinteile			psch.	500,00 €		
Verkehrssicherung			psch.	800,00 €		
				Summe Material / Sonstiges	7.188,00 €	
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Wartung (Austausch Leuchtmittel)						19.810,50 €

A.3.3.9 Einfahrtsbeleuchtung – Instandsetzung (Reparaturarbeiten)

Einfahrtsbeleuchtung - Instandsetzung (Reparaturarbeiten)					
Personalaufwand		Stunden	Lohn	Kosten	
Reparaturarbeiten*	psch.	10,0 h	50,00 €/h	500,00 €	
				Summe Personal	500,00 €
Sonstiges				Kosten	
Material*			psch.	500,00 €	
Sonstiges*			psch.	200,00 €	
				Summe Sonstiges	700,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Instandsetzung (Reparaturarbeiten)*					1.200,00 €

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

Verlauf der Reparaturkosten über den gesamten Lebenszyklus:



A.3.3.10 Einfahrtsbeleuchtung – Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)

Einfahrtsbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)						
Dauer	Ausfallrate	Leuchtenanzahl	Aufwand	Dauer		
frühzeitiger Ausfall Leuchtmittel	3,0 %	10 Stck.	15 min./Stck.	2,5 h		
frühzeitiger Ausfall Leuchten*	0,5 %	2 Stck.	30 min./Stck.	1,0 h		
Sonstiges			psch.	2,0 h		
Kosten Gerät			Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger			3,5 h	36,00 €/h	126,00 €	
Kleintransporter			5,5 h	12,50 €/h	68,75 €	
					Summe Gerät	194,75 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Leuchtmitteltausch	2 AK	3,5 h	7,0 h	50,00 €/h	350,00 €	
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
					Summe Personal	550,00 €
Kosten Material			Menge	EP	Kosten	
Leuchtmittel			10 Stck.	17,50 €/Stck.	175,00 €	
Leuchten			2 Stck.	410,00 €/Stck.	820,00 €	
Kleinteile				psch.	200,00 €	
					Summe Material	1.195,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)					1.939,75 €	

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

Der Verlauf der jährlichen Zunahme des Leistungs- und Kostenumfangs ist vergleichbar mit dem Verlauf für die Leistungen der Reparaturarbeiten (Abs. A.3.3.9).

A.3.3.11 Einfahrtsbeleuchtung – Erneuerung (Sensorik)

Einfahrtsbeleuchtung - Erneuerung (Sensorik)					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	60 h	70,00 €/h	4.200,00 €	
Verwaltung	psch.	40 h	60,00 €/h	2.400,00 €	
				Summe Planung	6.600,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (10% Sensorik + Sonstiges)		psch.	10 %	2.400,00 €	
				Summe Rückbau	2.400,00 €
Sensorik		Menge	EP	Kosten	
Sensor Außenleuchtdichte L20		2 Stck.	3.850,00 €/Stck.	7.700,00 €	
Sensor Leuchtdichte Einsichtstrecke		4 Stck.	2.750,00 €/Stck.	11.000,00 €	
				Summe Sensorik	18.700,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	2.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	5.000,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Erneuerung (Sensorik)					32.700,00 €

A.3.3.12 Einfahrtsbeleuchtung – Erneuerung (Leuchten)

Einfahrtsbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	700 h	70,00 €/h	49.000,00 €	
Verwaltung	psch.	500 h	60,00 €/h	30.000,00 €	
				Summe Planung	79.000,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (10% Leuchten + Kabel + Sonstiges)		psch.	10 %	30.600,00 €	
				Summe Rückbau	30.600,00 €
Leuchten		Menge	EP	Kosten	
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, asymmetrisch		124 Stck.	477,00 €/Stck.	59.148,00 €	
Spezialtunnelleuchte 250 W, einflammig, asymmetrisch		48 Stck.	481,00 €/Stck.	23.088,00 €	
Spezialtunnelleuchte 400 W, einflammig, asymmetrisch		160 Stck.	496,00 €/Stck.	79.360,00 €	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		124 Stck.	15,00 €/Stck.	1.860,00 €	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 250 W		48 Stck.	17,00 €/Stck.	816,00 €	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 400 W		160 Stck.	18,00 €/Stck.	2.880,00 €	
				Summe Leuchten	167.152,00 €
Verkabelung		Menge	EP	Kosten	
Kabel N2XH-J		18.000 m	4,40 €/lfm	79.200,00 €	
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung		1.000 m	37,00 €/lfm	37.000,00 €	
				Summe Verkabelung	116.200,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	20.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	23.000,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					415.952,00 €

A.3.4 Modul Innenbeleuchtung

A.3.4.1 Innenbeleuchtung – Planung

Innenbeleuchtung - Planung							
Planungskosten	Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Honorar- zone	Honorar- satz	Leistungs- phasen	Neben- kosten	Honorar
Objektplanung (§44)	429.000 €	20 %	IV	mindest	2 - 9	5 %	42.000,00 €
Techn. Ausrüstung (§56)	429.000 €	20 %	II	mittel	3 - 9	5 %	72.000,00 €
Summe Planung							114.000,00 €
Verwaltung		Anzahl	Dauer	Verdienst	Gemeinkosten- zuschlag	Kosten	
Projektleiter		0,5 AK	0,75 a	60.000 €/a	20 %	27.000,00 €	
Sachbearbeiter		1,0 AK	0,75 a	50.000 €/a	20 %	45.000,00 €	
Summe Verwaltung							72.000,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Planung							186.000,00 €

* Zur Berücksichtigung, dass es sich hier lediglich um Teilleistungen zur Gesamtplanung handelt.

A.3.4.2 Innenbeleuchtung – Umsetzung

Innenbeleuchtung - Umsetzung			
Leuchten	Menge	EP	Kosten
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, symmetrisch	276 Stck.	450,00 €/Stck.	124.200,00 €
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W	276 Stck.	15,00 €/Stck.	4.140,00 €
Summe Leuchten			128.340,00 €
Verkabelung	Menge	EP	Kosten
Kabel N2XH-J	30.000 m	4,40 €/lfm	132.000,00 €
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung	3.200 m	37,00 €/lfm	118.400,00 €
Summe Verkabelung			250.400,00 €
Sensorik	Menge	EP	Kosten
Sensor Leuchtdichte Innenstrecke	10 Stck.	2.750,00 €/Stck.	27.500,00 €
Summe Sensorik			27.500,00 €
Sonstiges			Kosten
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges	psch.		20.000,00 €
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.	psch.		3.000,00 €
Summe Sonstiges			23.000,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Umsetzung			429.240,00 €

A.3.4.3 Innenbeleuchtung – Versorgung

Innenbeleuchtung - Versorgung							
Betriebsstunden in den einzelnen Schaltstufen pro Jahr							
Stufe	100 %	75 %	50 %	25 %	Summe		
Betriebsstunden	2.920 h	0 h	3.650 h	2.190 h	8.760 h		
Äquivalente Betriebsstunden unter Volllast	2.920 h	0 h	1.825 h	548 h	5.293 h		
Tageszeit (RVS 09.02.41 - S.18)	08:00 - 16:00	-	04:00 - 08:00 16:00 - 22:00	22:00 - 04:00	-		
Leuchten		HST 150	HST 250	HST 400	Systemleistung Volllast		
Leistungsaufnahme Leuchte (max.)		150 W	250 W	400 W			
Verlustleistung Vorschaltgerät (VVG)		26 W	35 W	46 W			
Leuchtenanzahl		276 Stck.	0 Stck.	0 Stck.			
Leistungsaufnahme - Volllast		48,6 kW	0,0 kW	0,0 kW	48,6 kW		
Energiekosten Leuchten	Systemleistung Volllast	äquiv. Betriebsstunden Volllast	jährlicher Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten		
	48,6 kW	5.293 h	257.113 kWh	0,11 €/kWh	28.282,00 €		
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten
Leuchtdichte Innenstrecke	8.760 h	10 Stck.	50 W	500 W	4.380 kWh	0,11 €/kWh	481,80 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Versorgung					28.763,80 €		

A.3.4.4 Innenbeleuchtung – Reinigung

Innenbeleuchtung - Reinigung						
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer		
Reinigung (LKW)		30 Sek./Stck.	276 Stck.	2,3 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
LKW - Reinigung		2,3 h	85,00 €/h	195,50 €		
				Summe Gerät		195,50 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Reinigung (LKW)	1 AK	2,3 h	2,3 h	45,00 €/h	103,50 €	
Sonstige Arbeiten	2 AK	1,0 h	2,0 h	45,00 €/h	90,00 €	
				Summe Personal		193,50 €
Kosten Material	Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten	
Wasser inkl. Entsorgung	50 l/min	2,3 h	6,9 m³	5,00 €/m³	34,50 €	
				Summe Material		34,50 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Reinigung					423,50 €	

A.3.4.5 Innenbeleuchtung – Inspektion (Kontrolle)

Innenbeleuchtung - Inspektion (Kontrolle)						
Leistungen - Kontrolle (jährlich)		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Funktionskontrolle Leuchten + Unterkonstruktion		3,0 h/Röhre	2 Röhren	6,0 h		
Funktionskontrolle Verkabelung		1,0 h/Röhre	2 Röhren	2,0 h		
Funktionskontrolle Sensorik		0,5 h/Sensor	10 Sensoren	5,0 h		
Kontrolle Lichtausbeute, Leuchtdichtemessung, Regelung		2,0 h/Röhre	2 Röhren	4,0 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
PKW		8,0 h	10,00 €/h	80,00 €		
Hubsteiger		2,0 h	36,00 €/h	72,00 €		
Messgeräte		2,0 h	12,00 €/h	24,00 €		
				Summe Gerät	176,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Funktionskontrolle Leuchten + UK	2 AK	6,0 h	12,0 h	50,00 €/h	600,00 €	
Funktionskontrolle Verkabelung	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
Funktionskontrolle Sensorik	2 AK	5,0 h	10,0 h	50,00 €/h	500,00 €	
Kontrolle Lichtausbeute usw.	2 AK	4,0 h	8,0 h	50,00 €/h	400,00 €	
Sonstiges	2 AK	1,0 h	2,0 h	50,00 €/h	100,00 €	
				Summe Personal	1.800,00 €	
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Inspektion (Kontrolle)					1.976,00 €	

A.3.4.6 Innenbeleuchtung – Inspektion (Prüfung)

Innenbeleuchtung - Inspektion (Prüfung)						
Zusätzliche Leistungen - Prüfung (alle 3 Jahre)		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Prüfung Sensorik		1,0 h/Sensor	10 Sensoren	10,0 h		
Prüfung Verkabelung		3,0 h/Röhre	2 Röhren	6,0 h		
Prüfung Unterkonstruktion		2,0 h/Röhre	2 Röhren	4,0 h		
Zusatzkosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
PKW		8,0 h	10,00 €/h	80,00 €		
Hubsteiger		4,0 h	36,00 €/h	144,00 €		
Messgeräte		10,0 h	12,00 €/h	120,00 €		
				Summe Gerät	344,00 €	
Zusatzkosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Prüfung und Kalibrierung Sensorik	2 AK	10,0 h	20,0 h	50,00 €/h	1.000,00 €	
Prüfung Verkabelung	2 AK	6,0 h	12,0 h	50,00 €/h	600,00 €	
Prüfung Unterkonstruktion	2 AK	4,0 h	8,0 h	50,00 €/h	400,00 €	
				Summe Personal	2.000,00 €	
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Inspektion (Prüfung)					2.344,00 €	

A.3.4.7 Innenbeleuchtung – Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)

Innenbeleuchtung - Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)						
Dauer		Aufwand	Anzahl Röhren	Dauer		
Kalibrierung Leuchtdichte, inkl. Sensorik		4 h/Röhre	2 Stck.	8,0 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Messtechnik		8,0 h	20,00 €/h	160,00 €		
PKW		9,0 h	10,00 €/h	90,00 €		
				Summe Gerät	250,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Kalibrierung	2 AK	8,0 h	16,0 h	50,00 €/h	800,00 €	
Sonstige Arbeiten	1 AK	1,0 h	1,0 h	50,00 €/h	50,00 €	
				Summe Personal	850,00 €	
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Wartung (Kalibrierung Leuchtdichte)						1.100,00 €

A.3.4.8 Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel)

Innenbeleuchtung - Wartung (Austausch Leuchtmittel)						
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer		
planmäßiger Austausch Leuchtmittel		10 min./Stck.	276 Stck.	46,0 h		
Innenreinigung Leuchte		5 min./Stck.	276 Stck.	23,0 h		
Sonstiges			psch.	2,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		71,0 h	36,00 €/h	2.556,00 €		
Kleintransporter		71,0 h	12,50 €/h	887,50 €		
				Summe Gerät	3.443,50 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Leuchtmitteltausch	2 AK	69,0 h	138,0 h	50,00 €/h	6.900,00 €	
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
				Summe Personal	7.100,00 €	
Kosten Material / Sonstiges		Menge	Preis	Kosten		
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		276 Stck.	16,00 €/Stck.	4.416,00 €		
Kleinteile			psch.	500,00 €		
Verkehrssicherung			psch.	800,00 €		
				Summe Material / Sonstiges	5.716,00 €	
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Wartung (Austausch Leuchtmittel)						16.259,50 €

A.3.4.9 Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel und Vorschaltgerät)

Innenbeleuchtung - Wartung (Leuchtmittel- und Vorschaltgerätetausch)					
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer	
planmäßiger Austausch Leuchtmittel		10 min./Stck.	276 Stck.	46,0 h	
Innenreinigung Leuchte		5 min./Stck.	276 Stck.	23,0 h	
Austausch Vorschaltgerät (VVG)		5 min./Stck.	276 Stck.	23,0 h	
Sonstiges			psch.	2,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		94,0 h	36,00 €/h	3.384,00 €	
Kleintransporter		94,0 h	12,50 €/h	1.175,00 €	
				Summe Gerät	4.559,00 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	92,0 h	184,0 h	50,00 €/h	9.200,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	9.400,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Menge	EP	Kosten	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		276 Stck.	16,00 €/Stck.	4.416,00 €	
Vorschaltgerät VVG		276 Stck.	10,00 €/Stck.	2.760,00 €	
Kleinteile			psch.	500,00 €	
Verkehrssicherung			psch.	1.000,00 €	
				Summe Material / Sonstiges	8.676,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Wartung (Leuchtmittel- und Vorschaltgerätetausch)					22.635,00 €

A.3.4.10 Innenbeleuchtung – Instandsetzung (Reparaturarbeiten)

Innenbeleuchtung - Instandsetzung (Reparaturarbeiten)				
Personalaufwand		Stunden	Lohn	Kosten
Reparaturarbeiten*	psch.	10,0 h	50,00 €/h	500,00 €
				Summe Personal
				500,00 €
Sonstiges			Kosten	
Material*			psch.	500,00 €
Sonstiges*			psch.	200,00 €
				Summe Sonstiges
				700,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Instandsetzung (Reparaturarbeiten)*				1.200,00 €

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

Der angenommene Verlauf der jährlichen Zunahme des Leistungs- und Kostenumfanges ist kongruent zum Verlauf der Kosten für die Reparaturarbeiten der Einfahrtsbeleuchtung (Abs. A.3.3.9).

A.3.4.11 Innenbeleuchtung – Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)

Innenbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)					
Dauer	Ausfallrate	Leuchtenanzahl	Aufwand	Dauer	
frühzeitiger Ausfall Leuchtmittel	3,0 %	8 Stck.	15 min./Stck.	2,0 h	
frühzeitiger Ausfall Leuchten*	0,5 %	1 Stck.	30 min./Stck.	0,5 h	
Sonstiges			psch.	2,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		2,5 h	36,00 €/h	90,00 €	
Kleintransporter		4,5 h	12,50 €/h	56,25 €	
				Summe Gerät	
				146,25 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	2,5 h	5,0 h	50,00 €/h	250,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	450,00 €
Kosten Material		Menge	EP	Kosten	
Leuchtmittel		8 Stck.	16,00 €/Stck.	128,00 €	
Leuchten		1 Stck.	390,00 €/Stck.	390,00 €	
Kleinteile			psch.	200,00 €	
				Summe Material	718,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)				1.314,25 €	

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

Der angenommene Verlauf der jährlichen Zunahme des Leistungs- und Kostenumfanges ist kongruent zum Verlauf der Kosten für die Reparaturarbeiten der Einfahrtsbeleuchtung (Abs. A.3.3.9).

A.3.4.12 Innenbeleuchtung – Erneuerung (Sensorik)

Innenbeleuchtung - Erneuerung (Sensorik)					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	75 h	70,00 €/h	5.250,00 €	
Verwaltung	psch.	40 h	60,00 €/h	2.400,00 €	
				Summe Planung	7.650,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (10% Sensorik + Sonstiges)		psch.	10 %	3.400,00 €	
				Summe Rückbau	3.400,00 €
Sensorik		Menge	EP	Kosten	
Sensor Leuchtdichte Innenstrecke		10 Stck.	2.750,00 €/Stck.	27.500,00 €	
				Summe Sensorik	27.500,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	3.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	6.000,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Erneuerung (Sensorik)					44.550,00 €

A.3.4.13 Innenbeleuchtung – Erneuerung (Leuchten)

Innenbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	700 h	70,00 €/h	49.000,00 €	
Verwaltung	psch.	500 h	60,00 €/h	30.000,00 €	
				Summe Planung	79.000,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (10% Leuchten + Kabel + Sonstiges)		psch.	10 %	40.700,00 €	
				Summe Rückbau	40.700,00 €
Leuchten		Menge	EP	Kosten	
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, symmetrisch		276 Stck.	450,00 €/Stck.	124.200,00 €	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		276 Stck.	15,00 €/Stck.	4.140,00 €	
				Summe Leuchten	128.340,00 €
Verkabelung		Menge	EP	Kosten	
Kabel N2XH-J		30.000 m	4,40 €/lfm	132.000,00 €	
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung		3.200 m	37,00 €/lfm	118.400,00 €	
				Summe Verkabelung	250.400,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	25.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	28.000,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					526.440,00 €

A.3.5 Modul Lüftungsanlage

A.3.5.1 Lüftungsanlage – Planung

Lüftungsanlage - Planung							
Planungskosten	Anrechenbare Kosten	Abschlag*	Honorarzone	Honorarsatz	Leistungsphasen	Nebenkosten	Honorar
Objektplanung (§44)	642.000 €	20 %	IV	mindest	2 - 9	5 %	56.500,00 €
Techn. Ausrüstung (§56)	642.000 €	20 %	II	mittel	3 - 9	5 %	98.000,00 €
Summe Planung							154.500,00 €
Verwaltung		Anzahl	Dauer	Verdienst	Gemeinkostenzuschlag	Kosten	
Projektleiter		0,5 AK	1,00 a	60.000 €/a	20 %	36.000,00 €	
Sachbearbeiter		1,0 AK	1,00 a	50.000 €/a	20 %	60.000,00 €	
Summe Verwaltung							96.000,00 €
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Planung							250.500,00 €

* Zur Berücksichtigung, dass es sich hier lediglich um Teilleistungen zur Gesamtplanung handelt.

A.3.5.2 Lüftungsanlage – Umsetzung

Lüftungsanlage - Umsetzung			
Ventilatoren	Menge	EP	Kosten
Strahlventilatoren ø 1000 mm	22 Stck.	19.370,00 €/Stck.	426.140,00 €
Summe Leuchten			426.140,00 €
Verkabelung	Menge	EP	Kosten
Kabel	13.000 m	6,10 €/l/m	79.300,00 €
Summe Verkabelung			79.300,00 €
Sensorik	Menge	EP	Kosten
CO- und Sichtsichtrübungsmessgerät	8 Stck.	5.790,00 €/Stck.	46.320,00 €
Luftgeschwindigkeitsmessgerät	6 Stck.	6.660,00 €/Stck.	39.960,00 €
Summe Sensorik			86.280,00 €
Sonstiges			Kosten
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges	psch.		30.000,00 €
Funktionsprüfung, Inbetriebnahme, Messungen usw.	psch.		20.000,00 €
Summe Sonstiges			50.000,00 €
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Umsetzung			641.720,00 €

A.3.5.3 Lüftungsanlage – Versorgung

Lüftungsanlage - Versorgung								
Lüftung	Häufigkeit pro Jahr	Dauer	Anzahl Lüfter	Leistung je Lüfter	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten
Testbetrieb	4	30 min	22 Lüfter	16,4 kW	361 kW	722 kWh	0,11 €/kWh	79,38 €
Fehlalarm	12	15 min	18 Lüfter	16,4 kW	295 kW	886 kWh	0,11 €/kWh	97,42 €
(1 Röhre Vollast - 1 Röhre zur Überdruckbildung)							Summe Lüfter	176,79 €
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten	
CO- und Sichtsichtrübungsmessung	8.760 h	8 Stck.	80 W	640 W	5.606 kWh	0,11 €/kWh	616,70 €	
Luftgeschwindigkeitsmessung	8.760 h	6 Stck.	25 W	150 W	1.314 kWh	0,11 €/kWh	144,54 €	
Summe Sensorik							761,24 €	
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Versorgung							938,04 €	

A.3.5.4 Lüftungsanlage – Reinigung

Lüftungsanlage - Reinigung						
Dauer		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Reinigung Lüfter		20 min/Lüfter	22 Lüfter	7,3 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		7,3 h	36,00 €/h	262,80 €		
Kleintransporter		8,3 h	12,50 €/h	103,75 €		
				Summe Gerät	366,55 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Reinigung Lüfter	2 AK	7,3 h	14,6 h	45,00 €/h	657,00 €	
Sonstige Arbeiten	2 AK	1,0 h	2,0 h	45,00 €/h	90,00 €	
				Summe Personal	747,00 €	
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Reinigung						1.113,55 €

A.3.5.5 Lüftungsanlage – Inspektion (Kontrolle)

Lüftungsanlage - Inspektion (Kontrolle)						
Leistungen - Kontrolle		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Kontrolle mechanischer Anlagenteile		15 min/Lüfter	22 Lüfter	5,5 h		
Kontrolle elektromechanischer Anlagenteile		15 min/Lüfter	22 Lüfter	5,5 h		
Funktionskontrolle Sensorik		30 min/Sensor	14 Sensoren	7,0 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		11,0 h	36,00 €/h	396,00 €		
Messgeräte		12,5 h	8,00 €/h	100,00 €		
PKW		19,0 h	10,00 €/h	190,00 €		
				Summe Gerät	686,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Kontrolle mechanischer Anlagenteile	2 AK	5,5 h	11,0 h	50,00 €/h	550,00 €	
Kontrolle elektromechanischer Anlagenteile	2 AK	5,5 h	11,0 h	50,00 €/h	550,00 €	
Funktionskontrolle Sensorik	1 AK	7,0 h	7,0 h	50,00 €/h	350,00 €	
Sonstiges	1 AK	1,0 h	1,0 h	50,00 €/h	50,00 €	
				Summe Personal	1.500,00 €	
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Inspektion (Kontrolle)						2.186,00 €

A.3.5.6 Lüftungsanlage – Inspektion (Prüfung)

Lüftungsanlage - Inspektion (Prüfung)						
Leistungen - Prüfung		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Prüfung mechanischer Anlagenteile		15 min/Lüfter	22 Lüfter	5,5 h		
Prüfung elektromechanischer Anlagenteile		30 min/Lüfter	22 Lüfter	11,0 h		
Prüfung Sensorik		30 min/Sensor	14 Sensoren	7,0 h		
Prüfung Gesamtanlage		120 min/Anlage	1 Anlage	2,0 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		16,5 h	36,00 €/h	594,00 €		
Messgeräte		20,0 h	15,00 €/h	300,00 €		
PKW		26,5 h	10,00 €/h	265,00 €		
				Summe Gerät	1.159,00 €	
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Prüfung mechanischer Anlagenteile		2 AK	5,5 h	11,0 h	50,00 €/h	550,00 €
Prüfung elektromechanischer Anlagenteile		2 AK	11,0 h	22,0 h	50,00 €/h	1.100,00 €
Funktionsprüfung Sensorik		1 AK	7,0 h	7,0 h	50,00 €/h	350,00 €
Prüfung Gesamtanlage		2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
Sonstiges		1 AK	1,0 h	1,0 h	50,00 €/h	50,00 €
				Summe Personal	2.000,00 €	
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Inspektion (Prüfung)						3.159,00 €

A.3.5.7 Lüftungsanlage – Wartung

Lüftungsanlage - Wartung						
Dauer		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Lüfter - mechanische Anlagenteile		15 min/Lüfter	22 Lüfter	5,5 h		
CO- und Sichtsichtmessgerät		15 min/Sensor	8 Sensoren	2,0 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		5,5 h	36,00 €/h	198,00 €		
PKW		8,5 h	10,00 €/h	85,00 €		
				Summe Gerät	283,00 €	
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Lüfter - mechanische Anlagenteile		2 AK	5,5 h	11,0 h	50,00 €/h	550,00 €
CO- und Sichtsichtmessgerät		1 AK	2,0 h	2,0 h	50,00 €/h	100,00 €
Sonstiges		1 AK	1,0 h	1,0 h	50,00 €/h	50,00 €
				Summe Personal	700,00 €	
Kosten Material					Kosten	
Schmierstoffe, Kleinteile usw.					psch.	500,00 €
				Summe Material	500,00 €	
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Wartung						1.483,00 €

A.3.5.8 Lüftungsanlage – Instandsetzung (allgemeine Reparaturarbeiten)

Lüftung - Instandsetzung (Reparaturarbeiten)					
Personalaufwand		Stunden	Lohn	Kosten	
Reparaturarbeiten*	psch.	10,0 h	50,00 €/h	500,00 €	
				Summe Personal	500,00 €
Material			Kosten		
Material*			psch.	500,00 €	
Sonstiges*			psch.	200,00 €	
				Summe Material	700,00 €
Gesamtkosten Lüftung - Instandsetzung (Reparaturarbeiten)*					1.200,00 €

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

Der angesetzte Verlauf der jährlichen Zunahme des Leistungs- und Kostenumfangs ist vergleichbar mit dem Verlauf der Kosten für die Reparaturarbeiten der Einfahrtsbeleuchtung (Abs. A.3.3.9).

A.3.5.9 Lüftungsanlage – Instandsetzung (Reparatur Lüfter)

Lüftungsanlage - Instandsetzung (Reparatur Lüfter)						
Dauer	Aufwand	Anzahl	Dauer			
Austausch Lüfter	120 min/Lüfter	1 Lüfter	2,0 h			
Reparatur Lüfter		psch.	20,0 h			
Sonstiges		psch.	2,0 h			
Kosten Gerät	Dauer	EP	Kosten			
Hubsteiger	2,0 h	36,00 €/h	72,00 €			
Kran/Teleskoplader	2,0 h	33,00 €/h	66,00 €			
Kleintransporter inkl. Werkzeug	4,0 h	20,00 €/h	80,00 €			
				Summe Gerät	218,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Austausch Lüfter	3 AK	2,0 h	6,0 h	50,00 €/h	300,00 €	
Reparatur Lüfter	2 AK	20,0 h	40,0 h	50,00 €/h	2.000,00 €	
Sonstiges	1 AK	2,0 h	2,0 h	50,00 €/h	100,00 €	
					Summe Personal	2.400,00 €
Kosten Sonstiges				Kosten		
Ersatzteile				psch.	1.500,00 €	
Verkehrssicherung				psch.	1.000,00 €	
				Summe Sonstiges	2.500,00 €	
Gesamtkosten Lüftungsanlage - Instandsetzung (Reparatur Lüfter)					5.118,00 €	

A.3.5.10 Lüftungsanlage – Instandsetzung (Austausch Lüfter)

Lüftungsanlage - Instandsetzung (Austausch Lüfter)						
Dauer		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Austausch Lüfter		120 min/Lüfter	1 Lüfter	2,0 h		
Sonstiges			psch.	2,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Hubsteiger		2,0 h	36,00 €/h	72,00 €		
Kran/Teleskoplader		2,0 h	33,00 €/h	66,00 €		
Kleintransporter inkl. Werkzeug		4,0 h	20,00 €/h	80,00 €		
				Summe Gerät	218,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Austausch Lüfter	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
Sonstiges	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
				Summe Personal	400,00 €	
Kosten Sonstiges		Menge	EP	Kosten		
Lüfter (inkl. Entsorgung)		1 Lüfter	20.340,00 €/Stck.	20.340,00 €		
Kleinteile			psch.	200,00 €		
Verkehrssicherung			psch.	1.000,00 €		
				Summe Sonstiges	21.540,00 €	
					Gesamtkosten Lüftungsanlage - Instandsetzung (Austausch Lüfter)	22.158,00 €

A.3.5.11 Lüftungsanlage – Instandsetzung (Austausch Sensor)

Lüftungsanlage - Instandsetzung (Austausch Sensor)						
Dauer		Aufwand	Anzahl	Dauer		
Austausch Sensorik		60 min/Sensor	2 Sensoren	2,0 h		
Kalibrierung		30 min/Sensor	2 Sensoren	1,0 h		
Sonstiges			psch.	1,0 h		
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten		
Messgeräte		1,0 h	15,00 €/h	15,00 €		
Kleintransporter inkl. Werkzeug		4,0 h	20,00 €/h	80,00 €		
				Summe Gerät	95,00 €	
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten	
Austausch Sensorik	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €	
Kalibrierung	2 AK	1,0 h	2,0 h	50,00 €/h	100,00 €	
Sonstiges	2 AK	1,0 h	2,0 h	50,00 €/h	100,00 €	
				Summe Personal	400,00 €	
Kosten Material (inkl. Entsorgung)		Menge	EP	Kosten		
CO- und Sichterübungsmessgerät		1 Sensor	6.080,00 €/Stck.	6.080,00 €		
Luftgeschwindigkeitsmessgerät		1 Sensor	6.990,00 €/Stck.	6.990,00 €		
Kleinteile			psch.	200,00 €		
				Summe Material	13.270,00 €	
					Gesamtkosten Lüftungsanlage - Instandsetzung (Austausch Sensor)	13.765,00 €

A.3.5.12 Lüftungsanlage – Erneuerung (Sensorik)

Lüftung - Erneuerung (Sensorik)					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	80 h	70,00 €/h	5.600,00 €	
Verwaltung	psch.	80 h	60,00 €/h	4.800,00 €	
				Summe Planung	10.400,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (5% Sensorik + Sonstiges)		psch.	5 %	4.800,00 €	
				Summe Rückbau	4.800,00 €
Sensorik		Menge	EP	Kosten	
CO- und Sichttrübungsmessgerät		8 Stck.	5.790,00 €/Stck.	46.320,00 €	
Luftgeschwindigkeitsmessgerät		6 Stck.	6.660,00 €/Stck.	39.960,00 €	
				Summe Sensorik	86.280,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	5.000,00 €	
Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	4.000,00 €	
				Summe Sonstiges	9.000,00 €
Gesamtkosten Lüftung - Erneuerung (Sensorik)					110.480,00 €

A.3.5.13 Lüftungsanlage – Erneuerung (Lüfter)

Lüftung - Erneuerung (Lüfter)					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	800 h	70,00 €/h	56.000,00 €	
Verwaltung	psch.	500 h	60,00 €/h	30.000,00 €	
				Summe Planung	86.000,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (5% Lüfter + Kabel + Sonstiges)		psch.	5 %	27.800,00 €	
				Summe Rückbau	27.800,00 €
Bauteile		Menge	EP	Kosten	
Strahlventilatoren ø 1000 mm		22 Stck.	19.370,00 €/Stck.	426.140,00 €	
Kabel		13.000 m	6,10 €/l/m	79.300,00 €	
				Summe Bauteile	505.440,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	30.000,00 €	
Funktionsprüfung, Inbetriebnahme, Messungen usw.			psch.	20.000,00 €	
				Summe Sonstiges	50.000,00 €
Gesamtkosten Lüftung - Erneuerung (Lüfter)					619.240,00 €

A.4 Kalkulation der Teilleistungen für die Optimierungsansätze

Zur Bewertung der Optimierungsansätze erfolgt eine neue Bestimmung der Kosten der relevanten Module bzw. Prozesse. Ausgangsbasis sind die unter Abs. A.3 vorgenommenen Kalkulationen der einzelnen Leistungen und der dabei berücksichtigten Kalkulationsgrößen.

A.4.1 Kalkulation der Leistungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs der Beleuchtung durch Tunnelreinigung

A.4.1.1 Gewölbe Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)

Gewölbe - Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)						
Dauer	Wandhöhe	Arbeitsgeschw.	Tunnellänge	Anzahl	Zuschlag	Dauer
Vorsprühen	3,0 m	8,00 km/h	2,4 km	4,0		1,2 h
Reinigung (LKW)	3,0 m	1,25 km/h	2,4 km	4,0	20,0 %	9,2 h (-20 %)
Reinigung (händisch)					psch.	8,0 h (-20 %)
Entsorgung					psch.	3,0 h
Sonstiges					psch.	3,2 h (-20 %)
Kosten Gerät				Dauer	EP	Kosten
LKW - Vorsprühen				1,2 h	45,00 €/h	54,00 €
LKW - Reinigung				9,2 h	85,00 €/h	782,00 €
Hochdruckreiniger				8,0 h	3,00 €/h	24,00 €
LKW - Entsorgung				3,0 h	60,00 €/h	180,00 €
Summe Gerät						1.040,00 €
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Vorsprühen		1 AK	1,2 h	1,2 h	45,00 €/h	54,00 €
Reinigung (LKW)		2 AK	9,2 h	18,4 h	45,00 €/h	828,00 €
Reinigung (händisch)		2 AK	8,0 h	16,0 h	45,00 €/h	720,00 €
Entsorgung		2 AK	3,0 h	6,0 h	45,00 €/h	270,00 €
Sonstige Arbeiten		3 AK	3,2 h	9,6 h	45,00 €/h	432,00 €
Summe Personal						2.304,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Reinigungsmittel					psch.	500,00 € (-50 %)
Frischwasser (LKW)		120 l/min	7,7 h	55 m³	2,00 €/m³	110,00 €
Frischwasser (händisch)				3 m³	2,00 €/m³	6,00 €
Schmutzwasser				58 m³	3,00 €/m³	174,00 €
Verkehrssicherung					psch.	500,00 €
Summe Material / Sonstiges						1.290,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)						4.634,00 €

A.4.1.2 Gewölbe – Reinigung (Gewölbe komplett)

Reinigung - Tunnelgewölbe - Gewölbe komplett						
Dauer	Wandhöhe	Arbeitsgeschw.	Tunnellänge	Anzahl	Zuschlag	Dauer
Vorsprühen - Wände	3,0 m	8,0 km/h	2,4 km	4,0		1,2 h
Reinigung (LKW) - Wä	3,0 m	1,25 km/h	2,4 km	4,0	20,0 %	9,2 h (-20 %)
Vorsprühen - Gewölbe	12,2 m	8,0 km/h	2,4 km	2,0	10,0 %	2,7 h
Reinigung (LKW) - Ge	12,2 m	1,0 km/h	2,4 km	2,0	20,0 %	23,4 h
Reinigung (händisch)					psch.	18,0 h (-20 %)
Entsorgung					psch.	5,0 h (Anteil Gewölbe)
Sonstiges					psch.	5,0 h (-20 %) (Anteil Gewölbe)
Kosten Gerät				Dauer	EP	Kosten
LKW - Vorsprühen				4,0 h	45,00 €/h	180,00 €
LKW - Reinigung				32,6 h	85,00 €/h	2.771,00 €
Hochdruckreiniger				18,0 h	3,00 €/h	54,00 €
LKW - Entsorgung				5,0 h	60,00 €/h	300,00 €
Summe Gerät						3.305,00 €
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Vorsprühen	1 AK	4,0 h	4,0 h	45,00 €/h	180,00 €	
Reinigung (LKW)	2 AK	32,6 h	65,2 h	45,00 €/h	2.934,00 €	
Reinigung (händisch)	2 AK	18,0 h	36,0 h	45,00 €/h	1.620,00 €	
Entsorgung	2 AK	5,0 h	10,0 h	45,00 €/h	450,00 €	
Sonstige Arbeiten	3 AK	5,0 h	15,0 h	45,00 €/h	675,00 €	
Summe Personal						5.859,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Reinigungsmittel				psch.	1.000,00 € (-50 %)	
Frischwasser (LKW)	120 l/min	32,6 h	235 m³	2,00 €/m³	470,00 € (Anteil Gewölbe)	
Frischwasser (händisch)			5 m³	2,00 €/m³	10,00 €	
Schmutzwasser			240 m³	3,00 €/m³	720,00 €	
Verkehrssicherung				psch.	750,00 €	
Summe Material / Sonstiges						2.950,00 €
Gesamtkosten Reinigung - Tunnelgewölbe - Gewölbe komplett						12.114,00 €

A.4.1.3 Einfahrtsbeleuchtung – Versorgung

Versorgung - Einfahrtsbeleuchtung										
Betriebsstunden in den einzelnen Schaltstufen pro Jahr [in Anlehnung an Hopferwieser (1977)]										(Nacht)
Stufe	100 %	87,5 %	75 %	62,5 %	50 %	37,5 %	25 %	12,5 %	0,0 %	Summe
Betriebsstunden	600 h	450 h	400 h	450 h	600 h	500 h	700 h	680 h	4.380 h	8.760 h
Äquivalente Betriebsstunden unter Volllast	600 h	394 h	300 h	281 h	300 h	188 h	175 h	85 h	0 h	2.206 h (-5 %)
Leuchten		HST 150		HST 250		HST 400		Systemleistung Volllast		
Leistungsaufnahme Leuchte (max.)		150 W		250 W		400 W				
Verlustleistung Vorschaltgerät (VVG)		26 W		35 W		46 W				
Leuchtenanzahl		124 Stck.		48 Stck.		160 Stck.				
Leistungsaufnahme - Volllast		21,8 kW		13,7 kW		71,4 kW		106,9 kW		
Energiekosten Leuchten	Systemleistung Volllast	äquiv. Betriebsstunden Volllast	jährlicher Energieverbrauch		Energiepreis	Kosten				
	106,9 kW	2.206 h	235.742 kWh		0,11 €/kWh	25.932,00 €				
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten			
Außenleuchtdichte L20	8.760 h	2 Stck.	50 W	100 W	876 kWh	0,11 €/kWh	96,36 €			
Leuchtdichte Einsichtstrecke	8.760 h	4 Stck.	50 W	200 W	1.752 kWh	0,11 €/kWh	192,72 €			
Gesamtkosten Versorgung - Einfahrtsbeleuchtung									26.221,08 €	

A.4.1.4 Innenbeleuchtung – Versorgung

Versorgung - Innenbeleuchtung							
Betriebsstunden in den einzelnen Schaltstufen pro Jahr							
Stufe	100 %	75 %	50 %	25 %	Summe		
Betriebsstunden	2.920 h	0 h	3.650 h	2.190 h	8.760 h		
Äquivalente Betriebsstunden unter Volllast	2.920 h	0 h	1.825 h	548 h	5.028 h		
Tageszeit (RVS 09.02.41 - S.18)	08:00 - 16:00	-	04:00 - 08:00 16:00 - 22:00	22:00 - 04:00	- (-5 %)		
Leuchten		HST 150	HST 250	HST 400	Systemleistung Volllast		
Leistungsaufnahme Leuchte (max.)		150 W	250 W	400 W			
Verlustleistung Vorschaltgerät (VVG)		26 W	35 W	46 W			
Leuchtenanzahl		276 Stck.	0 Stck.	0 Stck.			
Leistungsaufnahme - Volllast		48,6 kW	0,0 kW	0,0 kW	48,6 kW		
Energiekosten Leuchten	Systemleistung Volllast	äquiv. Betriebsstunden Volllast	jährlicher Energieverbrauch		Energiepreis	Kosten	
	48,6 kW	5.028 h	244.240 kWh		0,11 €/kWh	26.866,00 €	
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten
Leuchtdichte Innenstrecke	8.760 h	10 Stck.	50 W	500 W	4.380 kWh	0,11 €/kWh	481,80 €
Gesamtkosten Versorgung - Innenbeleuchtung							27.347,80 €

A.4.2 Bestimmung der Attribute für das Modul Beschichtung

A.4.2.1 Beschreibung

Zum Schutz und zur Aufhellung der Tunnelinnenschale ist im Gewölbebereich eine Beschichtung der Betonoberfläche vorzunehmen. Hierzu ist im Spritzwasserbereich (Bodenzone – bis 3,00 m über OK Fahrbahn) eine Beschichtung der Anforderungsklasse UG₂, im darüberliegenden Ulmenbereich (Sprühnebelbereich) mindestens ein Oberflächenschutzsystem der Klasse UG₁ (inkl. des Firstbereiches) aufzubringen.

Die versiegelnde Wirkung verringert das Eindringen von Wasser und Schadstoffen, was zu einer Verlangsamung der Karbonatisierung und einer Erhöhung der Beständigkeit gegenüber Frost- und Frost-Tausalzeinwirkungen führt. Durch die Beschichtung wird zudem eine Glättung der Oberflächenstruktur erzielt, so dass ein Anheften von Schmutzpartikeln erschwert und die Reinigung erleichtert wird.⁸⁷⁸ Zum Aufbringen der Beschichtung werden an den Untergrund spezielle Anforderungen gestellt, was eine Vorbehandlung erforderlich macht.⁸⁷⁹

A.4.2.2 Definition und Abgrenzung des Moduls

Die Beschichtung hat eine Schutzfunktion für die Innenschale. Gleichzeitig übernimmt die Beschichtung gestalterische Aufgaben – insbesondere zur Steigerung der Helligkeit im Tunnel. Aufgrund der Aufgaben sowie der von der Innenschale stark abweichenden Lebensdauer, hat eine eigenständige Erfassung des Moduls zu erfolgen.

Funktionale Unabhängigkeit

Die Erfüllung der funktionalen Aufgabe (Schutzwirkung) wird vollständig durch die Beschichtung gewährleistet. Weitere Elemente bzw. Leistungen sind nicht erforderlich. Die funktionale Unabhängigkeit ist dadurch sichergestellt.

Physische Unabhängigkeit

Trotz der dauerhaften Verbindung zum Betontragwerk, kann durch den zeitlich getrennten Einbau und der notwendigen Entfernung zur regelmäßigen Erneuerung (z. B. mittels Hochdruckwasserstrahl) von einer physischen Unabhängigkeit zu weiteren Bestandteilen der Innenschale ausgegangen werden.

Integrität

Das Modul umfasst alle zur Funktionserfüllung erforderlichen Bestandteile. Eine Aggregation zu einem übergeordneten Untersuchungsrahmen ist durch die Eigenständigkeit gegeben.

A.4.2.3 Elemente

Die Beschichtung der Tunnelwände umfasst eine vollflächige Spachtelung mit polymermodifizierten Zementmörtel in einer Schichtdicke von mindestens 2 mm – bis 3,00 m über der Fahrbahn. Im darüberliegenden Gewölbebereich wird eine Hydrophobierung in Form einer Porenschichtelung aufgebracht.

⁸⁷⁸ vgl. ÖBV (2014)A, S. 2 ff.

In der ZTV-ING werden Beschichtungen zusammen mit der Hydrophobierung unter dem Begriff „Oberflächenschutzsystem“ subsumiert. [vgl. ZTV-ING (2013), Teil 3, Abschnitt 4, S. 6]

⁸⁷⁹ vgl. ZTV-ING (2013), Teil 3, Abschnitt 4, S. 13; ÖBV (2014)A, S. 6

A.4.2.4 Prozesse

Die für das Modul anfallenden Prozesse beschränken sich auf die Planung und Umsetzung in der Herstellungsphase sowie die Erneuerung während der Nutzungsphase. Eine Versorgung mit Strom bzw. Wasser ist nicht erforderlich. Reinigung und Inspektion werden für die Innenschale durchgeführt und verbleiben somit beim Modul „Gewölbe“. Eine Wartung bzw. Instandsetzung wird für die Beschichtung nicht vorgenommen. Vielmehr erfolgt bei einer nicht mehr ausreichenden Funktionserfüllung eine Erneuerung bzw. Modernisierung. Letzteres kann aufgrund der fehlenden Prognostizierbarkeit nur dann Berücksichtigung finden, sofern bereits vergleichbare Größen vorliegen oder eine (subjektive) Abschätzung vorgenommen wird. Aktuell sind keine entsprechenden Erfahrungswerte veröffentlicht, so dass auf einen Ansatz der Modernisierung verzichtet werden muss. Die Verwertungsphase und die dabei anfallenden Prozesse werden für das zu untersuchende Beispiel ebenfalls nicht betrachtet (Tabelle A.4.21).

Tabelle A.4.21: Relevante Prozesse für das Modul „Beschichtung“

Herstellung		Nutzung							Verwertung
Planung	Umsetzung	Versorgung	Reinigung	Inspektion	Wartung	Instandsetzung	Erneuerung	Modernisierung	Revitalisierung
X	X	-	-	-	-	-	X	-	-

A.4.2.5 Leistungen

Planung:

Bestandteil sind die Leistungen der Planung und Ausschreibung sowie die Aufwendungen für die bauherrninterne Verwaltung, die Prüfung der Planung sowie die Bauüberwachung und das Projektmanagement.

Umsetzung:

Das Herstellen der Beschichtung umfasst die gründliche Reinigung des Untergrundes sowie das Ausbessern örtlicher Fehlstellen (Löcher, Lunker usw.) mit dem abschließenden Aufbringen des Oberflächenschutzsystems.

Erneuerung:

Bei der Erneuerung hat zur Vorbereitung ein vollständiger Abtrag vorhandener Schutzsysteme zu erfolgen. Gleichzeitig sind zur Sicherstellung einer ausreichenden Haftzugfestigkeit lose Betonbestandteile zu entfernen und schadhafte Stellen instand zu setzen. Allerdings sind diese Leistungen den Instandsetzungsarbeiten für das Tunnelgewölbe zu zuordnen. Abschließend erfolgt das Aufbringen einer vollflächigen, polymervergüteten Spachtelung im Bereich der Tunnelwände (bis 3,00 m Wandhöhe).

Im Firstbereich erfolgt eine grundlegende Reinigung und Entfernung loser Bestandteile sowie ein erneuter Auftrag einer Hydrophobierung.⁸⁸⁰

⁸⁸⁰ Eine Hydrophobierung kann wiederholt direkt auf den vorhandenen Untergrund aufgebracht werden. Ein Entfernen bereits aufgetragener Schichten ist nicht erforderlich.
vgl. OEHMICHEN (2008), S. 67; RAUPACH, ORLOWSKY (2008), S. 208

A.4.2.6 Kosten

Planung:

Die Kosten für die Planung und Verwaltung werden über den Personalaufwand abgeschätzt (Abs. A.3.1.1).

Planungs-, Prüf- und Verwaltungskosten: 22.800,00 €

Umsetzung:

Die Kosten für die Herstellung der Beschichtung werden mit Hilfe von Erfahrungswerten über die zu beschichtende Fläche abgeschätzt (Abs. A.3.1.2). Kosten für Baustelleneinrichtung, Verkehrssicherung usw. sind dabei bereits berücksichtigt.

Umsetzung Beschichtung: 756.600,00 €

Erneuerung:

Die Kosten beinhalten neben den Kosten für die Erneuerung der Beschichtung auch die Kosten für die Planung und Verwaltung (Abs. A.3.1.2).

Erneuerung Beschichtung und Hydrophobierung: 1.270.400,00 €

A.4.2.7 Zeitliche Parameter

Planung & Umsetzung:

Der Anfallszeitpunkt für die Kosten der Planung und Umsetzung wird per Definition auf den Betrachtungszeitpunkt für die Lebenszykluskostenrechnung (Ende Herstellungsphase – Beginn Nutzungsphase) gelegt.

Erneuerung:

Die Lebensdauer einer Oberflächenbeschichtung ist begrenzt und deutlich geringer als die der Betonkonstruktion.⁸⁸¹ Zur Sicherstellung eines dauerhaften Betonschutzes hat deshalb eine regelmäßige Erneuerung – abhängig von der Lebensdauer der einzelnen Elemente (Beschichtung bzw. Hydrophobierung) – zu erfolgen. Die Lebensdauer sowohl für die Beschichtung als auch für die Hydrophobierung wird mit 10 bis 25 Jahren, z. T. sogar mit über 30 Jahren abgeschätzt. Exakte Prognosen sind bislang allerdings nicht möglich.⁸⁸² An dieser Stelle wird ein Erneuerungszyklus von 20 Jahren angesetzt.

Beschichtung und Hydrophobierung: alle 20 Jahre

A.4.2.8 Schnittstellen

Die Schnittstellen, die die Leistungen und Kosten für die Beschichtung beeinflussen, beschränken sich auf die zu beschichtende Fläche, die Beschaffenheit des Untergrundes und der Lösbarkeit für die Erneuerung. Zusätzlich ist die Art der Beschichtung als maßgebliche Größe einzubeziehen.

Gegenüber anderen Modulen hat die Beschichtung wesentlichen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der Betoninnenschale (Gewölbe), deren Reinigung (Umfang und Häufigkeit) sowie die erforderliche Leuchtdichte und daraus abgeleitet, den Energiebedarf der Tunnelbeleuchtung (Versorgung).

⁸⁸¹ vgl. LOHAUS ET AL. (2011), S. 479

⁸⁸² vgl. RAUPACH, ORLOWSKY (2008), S. 205; LOHAUS ET AL. (2011), S. 479

A.4.3 Kalkulation der Leistungen zur Untersuchung des Optimierungspotentials durch eine Beschichtung des Tunnelgewölbes

Neben der Berechnung der Kosten für das zusätzliche Modul „Beschichtung“, erfolgt zur Bewertung der Optimierungsansätze eine neue Bestimmung der Kosten der betroffenen Module bzw. Prozesse. Ausgangsbasis sind die unter Abs. A.3 vorgenommenen Kalkulationen der einzelnen Leistungen und der dabei berücksichtigten Kalkulationsgrößen.

A.4.3.1 Beschichtung Planung

Beschichtung - Planung					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	120 h	70,00 €/h	8.400,00 €	
Verwaltung	psch.	240 h	60,00 €/h	14.400,00 €	
				Summe Planung	22.800,00 €
Gesamtkosten Beschichtung - Planung					22.800,00 €

A.4.3.2 Beschichtung – Umsetzung

Beschichtung - Umsetzung				
Beschichtung	Menge	EP	Kosten	
Beschichtung (bis 3,00 m Wandhöhe)	28.800 m ²	15,10 €/m ²	434.880,00 €	
Hydrophobierung (Ulmen- und Firstbereich)	58.560 m ²	4,60 €/m ²	269.376,00 €	
Baustelleneinrichtung, Sonstiges		psch.	50.000,00 €	
			Summe Beschichtung	754.256,00 €
Gesamtkosten Beschichtung - Umsetzung				754.256,00 €

A.4.3.3 Beschichtung – Erneuerung

Beschichtung - Erneuerung					
Planung		Stunden	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	120 h	70,00 €/h	8.400,00 €	
Verwaltung	psch.	300 h	60,00 €/h	18.000,00 €	
				Summe Planung	26.400,00 €
Beschichtung		Menge	EP	Kosten	
Beschichtung (bis 3,00 m Wandhöhe)		28.800 m ²	30,20 €/m ²	869.760,00 €	
Hydrophobierung (Ulmen- und Firstbereich)		58.560 m ²	5,30 €/m ²	310.368,00 €	
Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	60.000,00 €	
			Summe Beschichtung	1.240.128,00 €	
Gesamtkosten Beschichtung - Erneuerung					1.266.528,00 €

A.4.3.4 Gewölbe – Reinigung

Gewölbe - Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)						
Dauer	Wandhöhe	Arbeitsgeschw.	Tunnellänge	Anzahl	Zuschlag	Dauer
Vorsprühen	3,0 m	10,00 km/h	2,4 km	4,0		0,0 h (-100 %)
Reinigung (LKW)	3,0 m	1,67 km/h	2,4 km	4,0	20,0 %	6,9 h (-40 %)
Reinigung (händisch)					psch.	6,0 h (-40 %)
Entsorgung					psch.	3,0 h
Sonstiges					psch.	2,4 h (-40 %)
Kosten Gerät				Dauer	EP	Kosten
LKW - Vorsprühen				0,0 h	45,00 €/h	0,00 €
LKW - Reinigung				6,9 h	85,00 €/h	586,50 €
Hochdruckreiniger				6,0 h	3,00 €/h	18,00 €
LKW - Entsorgung				3,0 h	60,00 €/h	180,00 €
Summe Gerät						784,50 €
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Vorsprühen		1 AK	0,0 h	0,0 h	45,00 €/h	0,00 €
Reinigung (LKW)		2 AK	6,9 h	13,8 h	45,00 €/h	621,00 €
Reinigung (händisch)		2 AK	6,0 h	12,0 h	45,00 €/h	540,00 €
Entsorgung		2 AK	3,0 h	6,0 h	45,00 €/h	270,00 €
Sonstige Arbeiten		3 AK	2,4 h	7,2 h	45,00 €/h	324,00 €
Summe Personal						1.755,00 €
Kosten Material		Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Reinigungsmittel					psch.	0,00 € (-100 %)
Frischwasser (LKW)		120 l/min	5,8 h	41 m³	2,00 €/m³	82,00 €
Frischwasser (händisch)				3 m³	2,00 €/m³	6,00 €
Schmutzwasser				44 m³	3,00 €/m³	132,00 €
Verkehrssicherung					psch.	400,00 € (-20 %)
Summe Material						620,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Reinigung (bis 3,00 m Wandhöhe)						3.159,50 €

Gewölbe - Reinigung (Gewölbe komplett)						
Dauer	Wandhöhe	Arbeitsgeschw.	Tunnellänge	Anzahl	Zuschlag	Dauer
Vorsprühen - Wände	3,0 m	10,00 km/h	2,4 km	4,0		1,0 h (-20 %)
Reinigung (LKW) - Wän.	3,0 m	1,67 km/h	2,4 km	4,0	20,0 %	6,9 h (-40 %)
Vorsprühen - Gewölbe	12,2 m	10,00 km/h	2,4 km	2,0	10,0 %	2,1 h
Reinigung (LKW) - Gew.	12,2 m	1,25 km/h	2,4 km	2,0	20,0 %	18,7 h (-20 %)
Reinigung (händisch)					psch.	12,0 h (-40 %)
Entsorgung					psch.	5,0 h
Sonstiges					psch.	3,6 h (-40 %)
Kosten Gerät				Dauer	EP	Kosten
LKW - Vorsprühen				3,1 h	45,00 €/h	139,50 €
LKW - Reinigung				26,0 h	85,00 €/h	2.210,00 €
Hochdruckreiniger				12,0 h	3,00 €/h	36,00 €
LKW - Entsorgung				5,0 h	60,00 €/h	300,00 €
Summe Gerät						2.685,50 €
Kosten Personal		Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Vorsprühen		1 AK	3,1 h	3,1 h	45,00 €/h	139,50 €
Reinigung (LKW)		2 AK	26,0 h	52,0 h	45,00 €/h	2.340,00 €
Reinigung (händisch)		2 AK	12,0 h	24,0 h	45,00 €/h	1.080,00 €
Entsorgung		2 AK	5,0 h	10,0 h	45,00 €/h	450,00 €
Sonstige Arbeiten		3 AK	3,6 h	10,8 h	45,00 €/h	486,00 €
Summe Personal						4.495,50 €
Kosten Material		Verbrauch	Dauer	Menge	EP	Kosten
Reinigungsmittel					psch.	500,00 € (-66 %)
Frischwasser (LKW)		120 l/min	26,0 h	187 m³	2,00 €/m³	374,00 €
Frischwasser (händisch)				5 m³	2,00 €/m³	10,00 €
Schmutzwasser				192 m³	3,00 €/m³	576,00 €
Verkehrssicherung					psch.	600,00 € (-20 %)
Summe Material						2.060,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Reinigung (Gewölbe komplett)						9.241,00 €

A.4.3.5 Gewölbe – Inspektion

Gewölbe - Inspektion (Prüfung)				
Bauwerksprüfung				
Aufwandsabschätzung gem. RVS 06.02.32 $H_A = F_A \times H_0 \times t \times u$				
Abrechnungsfläche F_A	18,2 m ² /m	4.800 m	87.360 m ²	
Grundwert H_0			0,0115 h/m ²	
Teilleistung Bearbeitung t	parallele Röhre +0,8 ohne Ulmendrainage -0,04		1,76	
Zustandsfaktor u	guter Zustand		0,60	
Aufwand für Bauwerksprüfung			1061,0 h	
Bauwerksprüfung				
		Dauer	Lohn	Kosten
Fahrzeiten/Rüstzeiten	pauschal	20,0 h	55,00 €/h	1.100,00 €
Bauwerksprüfung		1.061,0 h	55,00 €/h	58.355,00 €
Verwaltungsaufwand	Abschätzung 20%	216,2 h	55,00 €/h	11.891,00 €
Summe Personal Bauwerksprüfung				71.346,00 €
Geräte				
		Dauer	EP	Kosten
PKW		96,0 h	10,00 €/h	960,00 € (-20 %)
Kleintransporter inkl. Kleingeräte		96,0 h	30,00 €/h	2.880,00 € (-20 %)
Hubsteiger		96,0 h	36,00 €/h	3.456,00 € (-20 %)
Gerüst			psch.	1.500,00 €
Verkehrssicherung			psch.	8.000,00 € (-20 %)
Sonstiges			psch.	500,00 €
Summe Gerät				17.296,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Inspektion (Prüfung)				88.642,00 €

Gewölbe - Inspektion (Kontrolle)				
Kontrolle				
Aufwandsabschätzung gem. RVS 06.02.32 $H_A = F_A \times H_0 \times t \times u$				
Abrechnungsfläche F_A	18,2 m ² /m	4.800 m	87.360 m ²	
Grundwert H_0			0,0115 h/m ²	
Teilleistung Bearbeitung t	parallele Röhre +0,8 ohne Ulmendrainage -0,04		1,76	
Zustandsfaktor u	guter Zustand		0,60	
Aufwand für Kontrolle	1/3 des Aufwandes der Prüfung [Tathoff, Neuß (2002)]		354,0 h	
Bauwerksprüfung				
		Dauer	Lohn	Kosten
Fahrzeiten/Rüstzeiten	psch.	15,0 h	55,00 €/h	825,00 €
Bauwerksprüfung		354,0 h	55,00 €/h	19.470,00 €
Verwaltungsaufwand	Abschätzung 20%	73,8 h	55,00 €/h	4.059,00 €
Summe Personal Bauwerksprüfung				24.354,00 €
Geräte				
		Dauer	EP	Kosten
Kleintransporter mit Werkzeug		48,0 h	20,00 €/h	960,00 € (-20 %)
Verkehrssicherung			psch.	1.600,00 € (-20 %)
Sonstiges			psch.	200,00 €
Summe Gerät				2.760,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - Inspektion (Kontrolle)				27.114,00 €

A.4.3.6 Gewölbe – Instandsetzung

Gewölbe - 1. Instandsetzung				
Instandsetzungsfläche	Anteil	Breite	Länge	Menge
Instandsetzungsfläche	5,0 %	3,0 m	2.400 m	1.440,0 m ² (Anteil an Betonfläche bis 3 m Wandhöhe)
Schadhafte Betonfläche	1,0 %	18,2 m	2.400 m	873,6 m ² (Anteil an schadhafter Betonfläche - Bewehr.)
Bewehrungslänge	5,0 %		15 lfm/m ²	655,2 lfm (Anteil an schadhafter Bewehrung)
Baupreissteigerung (2004-2014)		23,5 % (gem. Statistik Austria - Brückenbau)		
Instandsetzungsarbeiten	Menge	EP (2004)	EP (2014)	Kosten
Lokalisieren Schadstellen	1.440,0 m ²	1,50 €/m ²	1,90 €/m ²	2.736,00 €
Betonabtrag HDW	1.440,0 m ²	15,50 €/m ²	19,20 €/m ²	27.648,00 €
Bewehrung freilegen	873,6 m ²	23,00 €/m ²	28,50 €/m ²	24.897,60 €
Bewehrung aufbereiten	655,2 lfm	13,00 €/lfm	16,10 €/lfm	10.548,72 €
Reprofilierung Beton	2.313,6 m ²	153,00 €/m ²	189,00 €/m ²	437.270,40 €
Gerüst	2.313,6 m ²	3,50 €/m ²	4,40 €/m ²	10.179,84 €
Verkehrssicherung			psch.	10.000,00 €
Baustelleneinrichtung			psch.	25.000,00 €
Summe Instandsetzungsarbeiten				548.280,56 €
Planung				Kosten
Planungskosten inkl. TWP			psch.	25.000,00 €
Verwaltungskosten			psch.	25.000,00 €
Summe Planung				50.000,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - 1. Instandsetzung				598.280,56 €

Gewölbe - 2. Instandsetzung				
Instandsetzungsfläche	Anteil	Breite	Länge	Menge
Instandsetzungsfläche	10,0 %	3,0 m	2.400 m	2.880,0 m ² (Anteil an Betonfläche bis 3 m Wandhöhe)
Schadhafte Betonfläche	3,0 %	18,2 m	2.400 m	2.620,8 m ² (Anteil an schadhafter Betonfläche - Bewehr.)
Bewehrungslänge	20,0 %		15 lfm/m ²	7.862,4 lfm (Anteil an schadhafter Bewehrung)
Baupreissteigerung (2004-2014)		23,5 % (gem. Statistik Austria - Brückenbau)		
Instandsetzungsarbeiten	Menge	EP (2004)	EP (2014)	Kosten
Lokalisieren Schadstellen	2.880,0 m ²	1,50 €/m ²	1,90 €/m ²	5.472,00 €
Betonabtrag HDW	2.880,0 m ²	15,50 €/m ²	19,20 €/m ²	55.296,00 €
Bewehrung freilegen	2.620,8 m ²	23,00 €/m ²	28,50 €/m ²	74.692,80 €
Bewehrung aufbereiten	7.862,4 lfm	13,00 €/lfm	16,10 €/lfm	126.584,64 €
Reprofilierung Beton	5.500,8 m ²	153,00 €/m ²	189,00 €/m ²	1.039.651,20 €
Gerüst	5.500,8 m ²	3,50 €/m ²	4,40 €/m ²	24.203,52 €
Verkehrssicherung			psch.	20.000,00 €
Baustelleneinrichtung			psch.	60.000,00 €
Summe Instandsetzungsarbeiten				1.405.900,16 €
Planung				Kosten
Planungskosten inkl. TWP			psch.	80.000,00 €
Verwaltungskosten			psch.	80.000,00 €
Summe Planung				160.000,00 €
Gesamtkosten Gewölbe - 2. Instandsetzung				1.565.900,16 €

A.4.3.7 Einfahrtsbeleuchtung – Umsetzung

Einfahrtsbeleuchtung - Umsetzung				
Leuchten	Menge	EP	Kosten	
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, asymmetrisch	118 Stck.	477,00 €/Stck.	56.286,00 €	(-5 %)
Spezialtunnelleuchte 250 W, einflammig, asymmetrisch	46 Stck.	481,00 €/Stck.	22.126,00 €	(-5 %)
Spezialtunnelleuchte 400 W, einflammig, asymmetrisch	152 Stck.	496,00 €/Stck.	75.392,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W	118 Stck.	15,00 €/Stck.	1.770,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 250 W	46 Stck.	17,00 €/Stck.	782,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 400 W	152 Stck.	18,00 €/Stck.	2.736,00 €	(-5 %)
Summe Leuchten			159.092,00 €	
Verkabelung	Menge	EP	Kosten	
Kabel N2XH-J	17.000 m	4,40 €/lfm	74.800,00 €	(-5 %)
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung	1.000 m	37,00 €/lfm	37.000,00 €	
Summe Verkabelung			111.800,00 €	
Sensorik	Menge	EP	Kosten	
Sensor Außenleuchtdichte L20	2 Stck.	3.850,00 €/Stck.	7.700,00 €	
Sensor Leuchtdichte Einsichtstrecke	4 Stck.	2.750,00 €/Stck.	11.000,00 €	
Summe Sensorik			18.700,00 €	
Sonstiges			Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges	psch.		15.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.	psch.		3.000,00 €	
Summe Sonstiges			18.000,00 €	
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Umsetzung			307.592,00 €	

A.4.3.8 Einfahrtsbeleuchtung – Versorgung

Einfahrtsbeleuchtung - Versorgung										
Betriebsstunden in den einzelnen Schaltstufen pro Jahr [in Anlehnung an Hopferwieser (1977)]										(Nacht)
Stufe	100 %	87,5 %	75 %	62,5 %	50 %	37,5 %	25 %	12,5 %	0,0 %	Summe
Betriebsstunden	600 h	450 h	400 h	450 h	600 h	500 h	700 h	680 h	4.380 h	8.760 h
Äquivalente Betriebsstunden unter Volllast	600 h	394 h	300 h	281 h	300 h	188 h	175 h	85 h	0 h	2.206 h
										(-5 %)
Leuchten	HST 150		HST 250		HST 400		Systemleistung Volllast			
Leistungsaufnahme Leuchte (max.)	150 W		250 W		400 W					
Verlustleistung Vorschaltgerät (VVG)	26 W		35 W		46 W					
Leuchtenanzahl	118 Stck.		46 Stck.		152 Stck.					
Leistungsaufnahme - Volllast	20,8 kW		13,1 kW		67,8 kW		101,7 kW			
Energiekosten Leuchten	Systemleistung Volllast	äquiv. Betriebsstunden Volllast	jährlicher Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten					
	101,7 kW	2.206 h	224.284 kWh	0,11 €/kWh	24.671,00 €					
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten			
Außenleuchtdichte L20	8.760 h	2 Stck.	50 W	100 W	876 kWh	0,11 €/kWh	96,36 €			
Leuchtdichte Einsichtstrecke	8.760 h	4 Stck.	50 W	200 W	1.752 kWh	0,11 €/kWh	192,72 €			
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Versorgung							24.960,08 €			

A.4.3.9 Einfahrtsbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel)

Einfahrtsbeleuchtung - Wartung (Leuchtmitteltausch)					
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer	
planmäßiger Austausch Leuchtmittel		10 min./Stck.	316 Stck.	53,0 h	(-5 %)
Innenreinigung Leuchte		5 min./Stck.	316 Stck.	26,0 h	(-5 %)
Sonstiges			psch.	2,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		81,0 h	36,00 €/h	2.916,00 €	
Kleintransporter		81,0 h	12,50 €/h	1.012,50 €	
				Summe Gerät	3.928,50 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	79,0 h	158,0 h	50,00 €/h	7.900,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	8.100,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Menge	EP	Kosten	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		118 Stck.	16,00 €/Stck.	1.888,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 250 W		46 Stck.	18,00 €/Stck.	828,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 400 W		152 Stck.	19,00 €/Stck.	2.888,00 €	(-5 %)
Kleinteile			psch.	500,00 €	
Verkehrssicherung			psch.	800,00 €	
				Summe Material / Sonstiges	6.904,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Wartung (Leuchtmitteltausch)					18.932,50 €

A.4.3.10 Einfahrtsbeleuchtung – Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)

Einfahrtsbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)					
Dauer		Ausfallrate	Leuchtenanzahl	Aufwand	Dauer
frühzeitiger Ausfall Leuchtmittel		3,0 %	9 Stck.	15 min./Stck.	2,3 h (-5 %)
frühzeitiger Ausfall Leuchten*		0,5 %	2 Stck.	30 min./Stck.	1,0 h (-5 %)
Sonstiges				psch.	2,0 h
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		3,3 h	36,00 €/h	117,00 €	
Kleintransporter		5,3 h	12,50 €/h	65,63 €	
				Summe Gerät	182,63 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	3,3 h	6,5 h	50,00 €/h	325,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	525,00 €
Kosten Material		Menge	EP	Kosten	
Leuchtmittel		9 Stck.	17,50 €/Stck.	157,50 €	(-5 %)
Leuchten		2 Stck.	410,00 €/Stck.	820,00 €	(-5 %)
Kleinteile			psch.	200,00 €	
				Summe Material	1.177,50 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)					1.885,13 €

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

A.4.3.11 Einfahrtsbeleuchtung – Erneuerung

Einfahrtsbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					
Planung		Aufwand	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	650 h	70,00 €/h	45.500,00 €	(-5 %)
Verwaltung	psch.	475 h	60,00 €/h	28.500,00 €	(-5 %)
				Summe Planung	74.000,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (10% Leuchten + Kabel + Sonstiges)			10 %	29.400,00 €	(-5 %)
				Summe Rückbau	29.400,00 €
Leuchten		Menge	EP	Kosten	
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, asymmetrisch		118 Stck.	477,00 €/Stck.	56.286,00 €	(-5 %)
Spezialtunnelleuchte 250 W, einflammig, asymmetrisch		46 Stck.	481,00 €/Stck.	22.126,00 €	(-5 %)
Spezialtunnelleuchte 400 W, einflammig, asymmetrisch		152 Stck.	496,00 €/Stck.	75.392,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		118 Stck.	15,00 €/Stck.	1.770,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 250 W		46 Stck.	17,00 €/Stck.	782,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 400 W		152 Stck.	18,00 €/Stck.	2.736,00 €	(-5 %)
				Summe Leuchten	159.092,00 €
Verkabelung		Menge	EP	Kosten	
Kabel N2XH-J		17.000 m	4,40 €/lfm	74.800,00 €	(-5 %)
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung		1.000 m	37,00 €/lfm	37.000,00 €	
				Summe Verkabelung	111.800,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	20.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	23.000,00 €
Gesamtkosten Einfahrtsbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					397.292,00 €

A.4.3.12 Innenbeleuchtung – Umsetzung

Innenbeleuchtung - Umsetzung					
Leuchten		Menge	EP	Kosten	
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, symmetrisch		262 Stck.	450,00 €/Stck.	117.900,00 €	(-5 %)
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		262 Stck.	15,00 €/Stck.	3.930,00 €	(-5 %)
				Summe Leuchten	121.830,00 €
Verkabelung		Menge	EP	Kosten	
Kabel N2XH-J		28.500 m	4,40 €/lfm	125.400,00 €	(-5 %)
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung		3.200 m	37,00 €/lfm	118.400,00 €	
				Summe Verkabelung	243.800,00 €
Sensorik		Menge	EP	Kosten	
Sensor Leuchtdichte Innenstrecke		10 Stck.	2.750,00 €/Stck.	27.500,00 €	
				Summe Sensorik	27.500,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	20.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	23.000,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Umsetzung					416.130,00 €

A.4.3.13 Innenbeleuchtung – Versorgung

Innenbeleuchtung - Versorgung							
Betriebsstunden in den einzelnen Schaltstufen pro Jahr							
Stufe	100 %	75 %	50 %	25 %	Summe		
Betriebsstunden	2.920 h	0 h	3.650 h	2.190 h	8.760 h		
Äquivalente Betriebsstunden unter Volllast	2.920 h	0 h	1.825 h	548 h	5.028 h		
Tageszeit (RVS 09.02.41 - S.18)	08:00 - 16: 00	-	04:00 - 08:00 16:00 - 22:00	22:00 - 04:00	-		
					(-5 %)		
Leuchten	HST 150	HST 250	HST 400				
Leistungsaufnahme Leuchte (max.)	150 W	250 W	400 W				
Verlustleistung Vorschaltgerät (VVG)	26 W	35 W	46 W				
Leuchtenanzahl	262 Stck.	0 Stck.	0 Stck.		Systemleistung Volllast		
Leistungsaufnahme - Volllast	46,1 kW	0,0 kW	0,0 kW		46,1 kW		
Energiekosten Leuchten	Systemleistung Volllast	äquiv. Betriebsstunden Volllast	jährlicher Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten		
	46,1 kW	5.028 h	231.851 kWh	0,11 €/kWh	25.504,00 €		
Sensorik	Dauer	Anzahl	Leistung je Sensor	Gesamtleistung	Energieverbrauch	Energiepreis	Kosten
Leuchtdichte Innenstrecke	8.760 h	10 Stck.	50 W	500 W	4.380 kWh	0,11 €/kWh	481,80 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Versorgung					25.985,80 €		

A.4.3.14 Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel)

Innenbeleuchtung - Wartung (Leuchtmitteltausch)					
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer	
planmäßiger Austausch Leuchtmittel		10 min./Stck.	262 Stck.	44,0 h	(-5 %)
Innenreinigung Leuchte		5 min./Stck.	262 Stck.	22,0 h	(-5 %)
Sonstiges			psch.	2,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		68,0 h	36,00 €/h	2.448,00 €	
Kleintransporter		68,0 h	12,50 €/h	850,00 €	
				Summe Gerät	3.298,00 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	66,0 h	132,0 h	50,00 €/h	6.600,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	6.800,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Menge	EP	Kosten	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		262 Stck.	16,00 €/Stck.	4.192,00 €	(-5 %)
Kleinteile			psch.	500,00 €	
Verkehrssicherung			psch.	800,00 €	
				Summe Material / Sonstiges	5.492,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Wartung (Leuchtmitteltausch)					15.590,00 €

A.4.3.15 Innenbeleuchtung – Wartung (Austausch Leuchtmittel und Vorschaltgeräte)

Innenbeleuchtung - Wartung (Leuchtmittel- und Vorschaltgerätetausch)					
Dauer		Aufwand	Leuchtenanzahl	Dauer	
planmäßiger Austausch Leuchtmittel		10 min./Stck.	262 Stck.	44,0 h	(-5 %)
Innenreinigung Leuchte		5 min./Stck.	262 Stck.	22,0 h	(-5 %)
Austausch Vorschaltgerät (VVG)		5 min./Stck.	262 Stck.	22,0 h	(-5 %)
Sonstiges			psch.	2,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		90,0 h	36,00 €/h	3.240,00 €	
Kleintransporter		90,0 h	12,50 €/h	1.125,00 €	
				Summe Gerät	4.365,00 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	88,0 h	176,0 h	50,00 €/h	8.800,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	9.000,00 €
Kosten Material / Sonstiges		Menge	EP	Kosten	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		262 Stck.	16,00 €/Stck.	4.192,00 €	(-5 %)
Vorschaltgerät VVG		262 Stck.	10,00 €/Stck.	2.620,00 €	(-5 %)
Kleinteile			psch.	500,00 €	
Verkehrssicherung			psch.	1.000,00 €	
				Summe Material / Sonstiges	8.312,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Wartung (Leuchtmittel- und Vorschaltgerätetausch)					21.677,00 €

A.4.3.16 Innenbeleuchtung – Instandsetzung

Innenbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)					
Dauer	Ausfallrate	Leuchtenanzahl	Aufwand	Dauer	
frühzeitiger Ausfall Leuchtmittel	3,0 %	8 Stck.	15 min./Stck.	2,0 h	(-5 %)
frühzeitiger Ausfall Leuchten*	0,5 %	1 Stck.	30 min./Stck.	0,5 h	(-5 %)
Sonstiges			psch.	2,0 h	
Kosten Gerät		Dauer	EP	Kosten	
Hubsteiger		2,5 h	36,00 €/h	90,00 €	
Kleintransporter		4,5 h	12,50 €/h	56,25 €	
				Summe Gerät	146,25 €
Kosten Personal	Anzahl	Dauer	Σ Stunden	Lohn	Kosten
Leuchtmitteltausch	2 AK	2,5 h	5,0 h	50,00 €/h	250,00 €
Sonstige Arbeiten	2 AK	2,0 h	4,0 h	50,00 €/h	200,00 €
				Summe Personal	450,00 €
Kosten Material		Menge	EP	Kosten	
Leuchtmittel		8 Stck.	16,00 €/Stck.	128,00 € (-5 %)	
Leuchten		1 Stck.	390,00 €/Stck.	390,00 € (-5 %)	
Kleinteile			psch.	200,00 €	
				Summe Material	718,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Instandsetzung (Leuchten und Leuchtmittel)					1.314,25 €

* Berücksichtigung einer jährlichen Zunahme der erforderlichen Leistungen bis zur Erneuerung.

A.4.3.17 Innenbeleuchtung – Erneuerung

Innenbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					
Planung		Aufwand	Lohn	Kosten	
Planung	psch.	650 h	70,00 €/h	45.500,00 € (-5 %)	
Verwaltung	psch.	475 h	60,00 €/h	28.500,00 € (-5 %)	
				Summe Planung	74.000,00 €
Rückbau			Anteil	Kosten	
Rückbau und Entsorgung (10% Leuchten + Kabel + Sonstiges)			10 %	39.400,00 € (-5 %)	
				Summe Rückbau	39.400,00 €
Leuchten		Menge	EP	Kosten	
Spezialtunnelleuchte 150 W, einflammig, symmetrisch		262 Stck.	450,00 €/Stck.	117.900,00 € (-5 %)	
Natriumdampf-Hochdrucklampen 150 W		262 Stck.	15,00 €/Stck.	3.930,00 € (-5 %)	
				Summe Leuchten	121.830,00 €
Verkabelung		Menge	EP	Kosten	
Kabel N2XH-J		28.500 m	4,40 €/lfm	125.400,00 € (-5 %)	
Kabelrinne 100 mm, inkl. Befestigung		3.200 m	37,00 €/lfm	118.400,00 €	
				Summe Verkabelung	243.800,00 €
Sonstiges				Kosten	
Kleinteile, Baustelleneinrichtung, Sonstiges			psch.	25.000,00 €	
Lichttechnische Messungen, Inbetriebnahme usw.			psch.	3.000,00 €	
				Summe Sonstiges	28.000,00 €
Gesamtkosten Innenbeleuchtung - Erneuerung (Leuchten)					507.030,00 €