

Entwicklung eines Prozessmodells zur
Produktivitätsoptimierung des maschinellen Tunnelvortriebs
unter Anwendung von Lean Methoden

Philipp Paul Wittenbrink

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:	Prof. Dr.-Ing. Otto Heunecke Universität der Bundeswehr München
1. Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz Universität der Bundeswehr München
2. Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes Ruhr-Universität Bochum

Die Dissertation wurde am 17.01.2019 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften am 05.04.2019 angenommen.

Die mündliche Prüfung fand am 08.04.2019 statt.

Neubiberg, den 16.05.2019

**Entwicklung eines Prozessmodells zur
Produktivitätsoptimierung des
maschinellen Tunnelvortriebs
unter Anwendung von Lean Methoden**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
Universität der Bundeswehr München

vorgelegt von

Philipp Paul Wittenbrink, M.Sc.

aus

München

Wenn ich acht Stunden Zeit hätte um einen Baum zu fällen, würde ich sechs Stunden die Axt schleifen.

(Abraham Lincoln, 16. Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika)

Ich halte nicht viel von jemandem, der heute nicht weiser als gestern ist.

(Abraham Lincoln, 16. Präsident der Vereinigten Staaten von Amerika)

Wir haben genug Zeit, wenn wir sie nur richtig verwenden.

(Johann Wolfgang von Goethe)

Plans are worthless, but planning is everything.

(Dwight D. Eisenhower)

Ein geeignetes Arbeitsverfahren kann man nicht am Schreibtisch entwerfen. Es muss in der Fabrik ausprobiert und mehrmals modifiziert werden. Außerdem muss es so gestaltet sein, dass jeder es sofort verstehen kann.

(Ohno, Das TPS, S.47)

Vorwort und Danksagung

Die folgenden Seiten spiegeln einen großen Teil an Erfahrungen, Einschätzungen und Schlussfolgerungen wider, die ich in Gesprächen mit Vorgesetzten, Unternehmensvertretern, Kollegen, Freunden und Familie gewinnen konnte. Ihnen Allen bin ich zu Dank verpflichtet.

Für die außerordentlich konstruktive Betreuung während der gesamten Promotion, gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwarz, Inhaber des Lehrstuhles für Baubetrieb der Universität der Bundeswehr München. Seine fachlichen und methodischen Anregungen auf Basis seiner Erfahrungen in der Bauwirtschaft und im Tunnelbau, haben wesentlich zur Qualität der Arbeit beigetragen. Für das entgegengebrachte Vertrauen und die mir gewährten wissenschaftlichen Freiräume, welche mir ein spannendes und herausforderndes Arbeitsfeld ermöglichten, möchte ich mich besonders bedanken.

Ebenso möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes für das große entgegengebrachte Interesse und die freundliche Übernahme des Koreferats dieser Arbeit bedanken. Seine Begeisterung für die Forschung und seine Anregungen zur vorliegenden Arbeit haben noch einmal zur Qualität dieser beigetragen.

Bedanken möchte ich mich beim Unternehmen Wayss & Freytag, für die Offenheit und die Gelegenheit für ein gemeinsames Forschungsprojekt. Ohne ein solches zukunftsorientiertes und unterstützendes Unternehmen wäre die Arbeit nicht in dieser Form zustande gekommen. Insbesondere bedanken möchte ich mich hierbei bei ihrem Vorstand Herrn Dr. Blaschko, der mir durch seine Begeisterung für das Thema von Beginn an gezeigt hat, dass meine investierte Zeit und meine Bemühungen einen Sinn haben. In besonderer Weise danken möchte ich auch Herrn Korndörfer, der ebenfalls durch sein Interesse für das Thema und seine Ideen dafür gesorgt hat, dass die Arbeit zielführend ist.

Ein großer Dank geht an die Kollegen und Freunde der Prof.-Jürgen Schwarz Consulting, Berenike, Anja, Rainer und Chris, die für ein außerordentlich freundschaftliches und unterstützendes Umfeld gesorgt haben. Ein besonderer Dank geht an den Geschäftsführer Bernd Schadl, der nicht nur stets sehr unterstützend war, sondern mich durch seinen Arbeitseifer auch immer sehr inspiriert hat.

Bedanken möchte ich mich auch bei den Kollegen vom Institut für Baubetrieb. Manuela Bradler danke ich dafür, dass sie stets ein offenes Ohr hatte und auf dringend benötigte Arbeitspausen hinwies. Den Wert hierfür kann man nicht bemessen und ich wünsche ihr deshalb nur das Beste für die Zukunft. Andreas Händler danke ich dafür, dass er immer einen Ausweg bei gedanklichen Sackgassen gefunden hat und mir bei den so vielen Programmierproblemen mit hilfreichem Rat zur Seite stand. Ebenso danke ich Markus Koschlik für die stets hilfreichen Denkanstöße und die Unterstützung bei allen Problemen. Ein großer Dank geht an Stephan Engelhardt für all seine Tipps, Unterstützung und Ideen. Und auch Dominika Johnen und ihrem Mann Robert danke ich für Ihre Unterstützung und ihre stets aufbauenden und motivierenden Worte.

Von Herzen danke ich meinen Eltern Hanna und Bernhard Wittenbrink, die mir alles in meinem Leben ermöglicht haben, stets an mich glauben und mir täglich vorleben, dass kein Traum zu groß ist. Auch meiner Schwestern Irmgard Wittenbrink danke ich dafür, dass sie immer für mich da ist, wenn ich sie brauche. Und auch für ihren Sohn Benedikt möchte ich ihr danken. Er zeigt mir täglich, dass ich eine Verpflichtung habe die Welt zu einem besseren Ort zu machen, damit auch seine Zukunft eine glückliche sein kann.

Mein größter Dank gilt meiner Verlobten Katharina. Nur mit ihr war es mir möglich meine Zweifel zu überwinden, mich täglich neu zu motivieren und stets mein Bestes zu geben. Ohne ihr Verständnis, ihren Rückhalt und ihr Vertrauen wäre kaum eine Zeile dieser Arbeit möglich gewesen.

Neubiberg, Januar 2019 Philipp Paul Wittenbrink

Kurzfassung

Bauprojekte sind aufgrund ihres Unikatcharakters mit relativ hohen Unsicherheiten verbunden und durch verschiedene exogene und endogene Einflüsse gekennzeichnet. Einen Spezialfall des Baugewerbes stellt der maschinelle Tunnel- bzw. Rohrvortrieb dar. Zu den bei diesem zu beachtenden Einflüssen sind neben der Heterogenität des Baugrundes (= Geologie) die allgemeinen Standortbedingungen wie Raumangebot, Zugänglichkeit, Topologie oder Klima zu zählen.

Die Gesamtkapazität eines Rohrvortriebs ist stark von der Kapazität einzelner Prozesse abhängig, insbesondere von der Kapazität (= Geschwindigkeit und Häufigkeit) des Vortriebs (= Bodenabbau). Um einen effizienten Ablauf des Vortriebs zu gewährleisten und somit die Produktivität des Gesamtprojektes zu optimieren, ist es wichtig, die zahlreichen zeit- und ressourcenintensiven Stillstandzeiten zu reduzieren. Zu den Hauptursachen für diese Stillstände zählen u.a. technische Probleme, schlechte Planung, Verschwendungen im Baubetrieb, das Fehlen von Hilfsmitteln und das Verhalten bei Planabweichungen. Insbesondere Bauablaufstörungen zählen zu den größten Verlustquellen bzgl. der Ausführung von Bauleistungen. Zur Umsetzung der Produktivitätsoptimierung wurden die auftretenden Prozesse strukturiert und verschiedene Werkzeuge des Lean Managements angewendet. Die Optimierung der Prozessproduktivität findet in drei Schritten statt. Im ersten Schritt werden die werterzeugenden Prozesse und ihre Abfolge optimiert. Im zweiten Schritt werden zusätzlich die Unterstützungsprozesse berücksichtigt und diese, sowie die Abhängigkeiten aller planbaren Prozesse untereinander, optimiert. Das aus der Automobilbranche stammende Lean Thinking, strebt mit seinen Methoden und Prinzipien eine kontinuierliche Verbesserung der Produktivität durch die Verringerung der Verschwendungen an. Verschiedene dieser Techniken wurden bereits unter dem Namen Lean Construction auf das Bauwesen adaptiert und die meisten dieser Techniken setzen bei den ersten beiden Schritten an. Der dritte Schritt, bei welchem zusätzlich die ungeplanten Störprozesse berücksichtigt werden, wird jedoch bisher kaum beachtet, obwohl das Potential der Produktivitätssteigerung an dieser Stelle groß ist. Aus diesem Grund berücksichtigt das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell insbesondere diesen dritten Schritt. Hierzu werden Prozesse ermittelt, welche insbesondere während eines Stillstandes unter den aktuellen Randbedingungen des Rohrvortriebs (Dauer, Ressourcen, Platz, Lärm) parallel zum stillstandverursachenden Prozess ausführbar sind und zukünftig ebenfalls einen Stillstand verursachen werden. Ein Stillstand wird entweder durch einen notwendigen Unterstützungsprozess oder einen Störprozess verursacht. Sobald ein Stillstand und sein verursachender Prozess bekannt sind, wird ermittelt, ob die parallele Ausführung weiterer Prozesse während dieses Prozesses möglich und mit Blick auf den gesamten Rohrvortrieb sinnvoll ist. Das Ziel hierbei ist, dass sobald der Störprozess behoben ist, der geplante werterzeugende Ablauf so lange wie möglich ungestört fortgesetzt werden kann. Hierzu werden die Prozesse, deren Ausführung parallel möglich ist, anhand von Kriterien ermittelt. Falls mehrere Prozesse parallel möglich sind, werden diese bzgl. ihres zukünftigen Einflusses sinnvoll anhand von Filtern geordnet. Das verantwortliche Personal bekommt somit eine Entscheidungshilfe mit - ganzheitlich betrachtet - sinnvollen Vorschlägen für den weiteren Rohrvortriebsablauf.

Die Funktionalität und Anwendbarkeit des Prozessmodells wird an einem Rohrvortriebsprojekt validiert. Dabei konnte sowohl die Flexibilität und Anpassbarkeit wie auch die intuitive Anwendung des Modells im realen Einsatz dargelegt werden.

Abstract

Due to their unique character building projects are associated with relatively high uncertainties and are characterized by various exogenous and endogenous influences. A special branch of the construction industry is tunneling or respectively pipe jacking. In this sector various factors need to be considered, like the heterogeneity of the ground (= geology) and the general site conditions such as space, accessibility, topology or climate.

The capacity of a pipe jacking project is considerably dependent on the capacity of individual processes, in particular on the capacity (= speed and frequency) of the soil excavation process. In order to ensure efficient work and thus the optimization of the productivity of the overall project, it is very important to reduce the number of the many time- and resource-intensive downtimes. Among the main causes of these downtimes are poor planning, waste (of time and resources), the missing of helpful tools and the behavior in unplanned situations. Structural disturbances are among the largest sources of loss regarding the execution of construction works.

In order to establish a productivity optimization, the known occurring processes were structured and various tools from the lean area were implemented. The productivity-optimization is done in three steps. The first step is concentrates on the value-generating processes and also their sequences are optimized. The second step also considers optimization of the support processes as well as the dependencies of all plannable processes.

The lean thinking methods and principles, which come from the automotive industry, is focused on continuously improving the productivity by reducing waste within the processes. Several of these techniques have already been adapted to the construction industry under the name Lean Construction and most of these techniques start with the first two steps.

However, the third step, in which additionally the unplanned disturbance processes are taken into account, is hardly considered, although it does have great potential for increasing the productivity. For this reason, the process model developed in this thesis is concentrating on this third step for the better part and is therefore detecting processes, particularly during standstills, which can be executed parallel to the standstill-causing process (and which may also cause a standstill in the near future), under the consideration of the current conditions of the project like the duration, the resources, the space or the noise.

A stoppage is caused either by a necessary support process or a disruptive process. Once a stoppage and its reason are identified, it is determined whether the parallel execution of other processes during this process is possible and with regard to the entire project, makes sense. The aim of this is that once the disruptive process is resolved, the scheduled value-generating processes can continue as long as possible without any further disturbances. For this purpose, the processes whose parallel execution is possible are identified on the basis of predefined criteria. If several processes are parallel possible, these processes are sorted by certain filters which are regarded by their future influences. The process model thus is a decision-making tool for the responsible site staff, which provides reasonable suggestions for further processes.

The functionality and applicability of the process model is verified on a pipe jacking project. Both, the flexibility and the adaptability as well as the intuitive use of the model in real use could be shown.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Formelverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Motivation und Zielsetzung	4
1.3 Abgrenzung und Stand der Forschung.....	6
1.3.1 Forschungsarbeit zur Implementierung von Lean Methoden in der Bauproduktion	7
1.3.2 Forschungsarbeit zur Adaption von Lean Techniken zur Prozessoptimierung.....	8
1.3.3 Forschungsarbeit zur Prozessoptimierung im maschinellen Tunnelbau anhand von Prozesssimulationen	9
1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	11
2 Bauproduktion, Bauablauf und Bauprozessmanagement	14
2.1 Produktion und Bauproduktion	14
2.1.1 Produktion und System	15
2.1.2 Bauproduktion / Bauprozess	16
2.1.3 Bauproduktionsfaktoren	18
2.1.4 Potential und Kapazität des Baubetriebes.....	21
2.1.5 Prozessoptimierung durch Produktivitätssteigerung	22
2.2 Bauablauf.....	25
2.2.1 Ablaufplanung	25
2.2.2 Detaillierungsgrad von der Ablauf- zur Terminplanung.....	25
2.2.3 Darstellungsformen der Terminplanung	26
2.2.4 Unsicherheiten im Bauablauf	29
2.2.5 Schwankungen und Störungen im Bauablauf.....	30
2.3 (Bau-)Prozessmanagement	40
2.3.1 Prozessmanagement	41
2.3.2 Prozessarten.....	42
3 Strukturierung und Zielstellung Prozessmodell	45
3.1 Definition Prozesskategorien.....	46
3.1.1 Prozesskategorien	46
3.1.2 Beschreibung der Prozesskategorien.....	47
3.2 Prozesskategorien zur Produktivitätssteigerung in drei Schritten	50
3.3 Leitprozess	51
3.4 Herleitung der Ziele des Prozessmodells	53

4 Grundlagen für die Prozessmodellentwicklung.....	58
4.1 Vorgehen	58
4.2 Grundlagen Modell.....	60
4.3 Anforderungen an das Prozessmodell	62
4.4 Optimierungsmodell	64
4.4.1 Formulierung eines allgemeinen Optimierungsmodells	64
4.4.2 Beispiel für ein Optimierungsproblem im Rohrvortrieb.....	65
5 Lean Methoden als Werkzeuge zur Produktivitätssteigerung	68
5.1 Der Weg von Toyota über Lean Thinking zu Lean Construction.....	68
5.2 Das Toyota-Produktionssystem	69
5.2.1 Aufbau und Methoden.....	69
5.2.2 Verschwendung - <i>Muda</i>	70
5.2.3 Just-in-time	73
5.2.4 Autonome Automation (<i>Jidōka</i>)	76
5.3 Lean Thinking	79
5.3.1 Wert (Value).....	80
5.3.2 Wertstrom (Value Stream).....	81
5.3.3 Fluss (Flow)	83
5.3.4 Takt.....	85
5.3.5 Zug (Pull)	86
5.3.6 Null-Fehler (Perfection) / KVP	88
5.4 Theory of Constraints.....	91
5.4.1 Grundlagen und Ursprung der TOC	91
5.4.2 Methoden der TOC	94
5.5 Lean Construction.....	98
5.5.1 Kundendefinition: Prozesskunde	99
5.5.2 Lean Construction Methoden	100
5.6 Lean Construction im maschinellen Tunnelvortrieb	104
5.6.1 Optimierung des Rohrwechsels bei Ways & Freytag	104
5.6.2 Lean Ansätze im konventionellen Tunnelbau bei Alfred Kunz Untertagebau.....	104
6 Grundlagen Tunnelbau.....	106
6.1 Tunnelbau.....	106
6.1.1 Begriffe Tunnelbau.....	107
6.1.2 Vortriebsmethoden im Tunnelbau	109
6.2 Maschinelles Tunnelvortrieb	110
6.2.1 Tunnelvortriebsmaschinen	111
6.2.2 Schildvortriebsverfahren	112
6.3 Rohrvortrieb	114
6.3.1 Allgemeines	114
6.3.2 Ablauf Rohrvortrieb	115
6.4 Sprengvortrieb	117
6.4.1 Sprengvortrieb Allgemeines	117
6.4.2 Sprengvortrieb Prozesse.....	118

7	Entwicklung Prozessmodell zur Produktivitätsoptimierung.....	125
7.1	Datengenerierung für das Prozessmodell	126
7.1.1	Datenerfassung.....	126
7.1.2	Datenaufbereitung und Kennzahlenbildung.....	127
7.2	Leitprozessermittlung im dritten Schritt der Produktivitätssteigerung.....	129
7.3	Parallele Ausführung DWEP und IWEP	132
7.4	Ermittlung zukünftiger IWEP und NWEF	135
7.5	KVP des Prozessmodells durch Dokumentation	136
7.6	Zusammenfassung Parallelprozessauswahl und Dokumentation.....	137
7.7	Kriterien und Filter des Prozessmodells - Störfall.....	138
7.7.1	Kriterien	140
7.7.2	Filter.....	146
7.8	Werkzeuge des Prozessmodells	151
8	Validierung Prozessmodell und Methodik im Rohrvorrieb	157
8.1	Projektbeschreibung	158
8.2	Rohrvorriebsdaten für das Prozessmodell.....	160
8.3	Prozesskategorien Rohrvorrieb.....	163
8.4	Ermittlung, Optimierung und Nutzung Prozesse Rohrvorrieb	170
8.4.1	Ermittlung zukünftiger IWEP und NWEF	170
8.4.2	Dokumentation zur kontinuierlichen Verbesserung	170
8.4.3	Zusammenfassung der Ziele des Prozessmodells beim Rohrvorrieb	171
8.4.4	Leitprozessauswahl und Entscheidung über Parallelprozesse im Rohrvorrieb	171
8.5	Kriterien und Filter des Prozessmodells - Rohrvorrieb.....	173
8.5.1	Kriterien Rohrvorrieb	174
8.5.2	Filter Rohrvorrieb	186
8.6	Aufbau Prozessmodell	192
8.6.1	Modellierung Prozessmodell	192
8.6.2	Seite „Startseite“	193
8.6.3	Seite „Prozesse“	197
8.6.4	Seite „Prozessanlage“.....	198
8.7	Beispiele für verschiedene Fälle der Prozessstörungen	199
8.7.1	Systembedingte Ausfallzeit	199
8.7.2	Wartezeit.....	201
8.7.3	Betriebsstörung.....	203
8.7.4	Sonstige Störung	205
9	Ergebnisse und Schlussbetrachtung	207
9.1	Ergebnisüberblick und Zusammenfassung.....	207
9.2	Ausblick	212
	Literaturverzeichnis	214
	Anlagen	230

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Auftragseingang im Tiefbau in Deutschland von 2002 bis 2017	1
Abb. 2: Ablaufschema zur Gliederung.....	12
Abb. 3: Aufbau der Arbeit.....	13
Abb. 4: Bauproduktionsfaktoren.....	18
Abb. 5: Potential und Kapazität.....	22
Abb. 6: Schema Netzplan-Knoten mit Informationen.....	28
Abb. 7: Darstellung und Erläuterung der möglichen Anordnungsbeziehungen.....	28
Abb. 8: Schwankungsbereich der Zeit und der Vollständigkeit von Prozess X_i	31
Abb. 9: Gestörter Gesamtprozess - mögliche Störungskombinationen.....	32
Abb. 10: Gesamtprozess SOLL und IST - Mit und ohne Beschleunigungsmaßnahme.....	35
Abb. 11: Beispiel Potentialverschiebung - SOLL.....	36
Abb. 12: Beispiel Potentialverschiebung - IST gestört.....	37
Abb. 13: Beispiel Potentialverschiebung - IST gestört, Anpassung Abfolge.....	38
Abb. 14: Prozessarten des Bauprozessmanagements.....	44
Abb. 15: Drei Schritte zur Produktivitätssteigerung.....	50
Abb. 16: Flussdiagramm - Identifizierung Leitprozess mit einem DWEP.....	51
Abb. 17: Flussdiagramm - Identifizierung Leitprozess mit n DWEP, mit $i = 1$ bis $n - 2$	52
Abb. 18: Flussdiagramm zum Ziel 3 Parallele Ausführung zukünftiger Prozesse.....	55
Abb. 19: Zielsystem Prozessmodell.....	55
Abb. 20: Zusammenhang der Ziele des Prozessmodells und den Forschungsfragen.....	56
Abb. 21: Ablauf Problemlösungsprozess.....	58
Abb. 22: Schritte 1 und 2 des Problemlösungsprozesses.....	59
Abb. 23: Das Toyota Produktionssystem mit ausgewählten Hilfsmitteln.....	69
Abb. 24: Fünf Grundprinzipien des Lean Thinking.....	79
Abb. 25: Wert-Kunde-Hersteller-Beziehung.....	80
Abb. 26: Beispiel für Materialstrom und Informationsstrom.....	81
Abb. 27: Systematisierung der Arbeitszeiten auf einer Baustelle.....	82
Abb. 28: Beispiel Vergleich Einzelstückfluss und Arbeitspakete - Ausgangssituation.....	84
Abb. 29: Beispiel Vergleich Einzelstückfluss und Arbeitspakete - Resultat.....	84
Abb. 30: KVP als Motor.....	89
Abb. 31: Drei Prinzipien zur Erreichung robuster Prozesse.....	90
Abb. 32: Wirtschaftlichkeitskennzahlen und Magisches Projektmanagement Dreieck.....	92
Abb. 33: Drum-Buffer-Rope System.....	96
Abb. 34: Bezeichnungen Tunnellängsschnitt.....	108
Abb. 35: Bezeichnungen Tunnelquerschnitt.....	108
Abb. 36: Einteilung Vortriebsmethoden Tunnelbau.....	109
Abb. 37: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen.....	111
Abb. 38: Stabilisierung der Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4).....	112
Abb. 39: Schildvortrieb im Rohrvortrieb.....	114
Abb. 40: Schlüsselprozesse Sprengvortrieb (mit Überschneidungsbereichen).....	119
Abb. 41: Dritter Schritt zur Produktivitätssteigerung.....	129
Abb. 42: Flussdiagramm zur Ermittlung des Leitprozesses im Sprengvortrieb.....	131
Abb. 43: Flussdiagramm Ermittlung von Parallelprozessen im Sprengvortrieb - Teil 1...	133
Abb. 44: Flussdiagramm Ermittlung von Parallelprozessen im Sprengvortrieb - Teil 2...	134
Abb. 45: Flussdiagramm Ermittlung zukünftigen IWEP und NWEF.....	135

Abb. 46: Flussdiagramm - KVP durch Dokumentation der Prozesse.....	136
Abb. 47: Flussdiagramm Zusammenfassung Parallelprozesse und Dokumentation.....	137
Abb. 48: Zielsystem Prozessmodell	138
Abb. 49: Ablaufschema Prozessmodell - Ermittlung Parallelprozesse (PP).....	139
Abb. 50: Ablaufschema Kriterienabfrage.....	141
Abb. 51: Beispiel Kriterium Ressourcen.....	143
Abb. 52: Beispielfälle zu den Möglichkeiten der individuellen Prozessdaueranpassung.	145
Abb. 53: Ablauf Anwendung der Filter zur Rangfolgenbildung	147
Abb. 54: Normierung der Fälligkeit auf eine Normskala von 0 bis 10	149
Abb. 55: Projektlageplan.....	158
Abb. 56: Flussdiagramm Identifizierung des Leitprozess im Rohrvortrieb mit 2 DWEP .	164
Abb. 57: Zweiter Schritt zur Produktivitätssteigerung	166
Abb. 58: Prozesse/Prozesskategorien im Rohrvortrieb	169
Abb. 59: Ablaufschema Prozessmodell - Leitprozess und Parallelprozess Rohrvortrieb	172
Abb. 60: Ablaufschema Kriterienabfrage Rohrvortrieb	175
Abb. 61: Beispiel Kriterium Ressource.....	177
Abb. 62: Beispiel Darstellung Kriterium Prozessdauer	178
Abb. 63: Beispiel alternative Anwendung Dauer - Referenzwerte (deterministisch)	179
Abb. 64: Verteilungskurve, Häufigkeiten Prozessdauern - Betriebsstörung Schneidrad .	181
Abb. 65: Verteilungskurve, Häufigkeiten Prozessdauern - Kabelverlängerung.....	182
Abb. 66: Verteilungskurve, Häufigkeiten Prozessdauern - Förderkreislauf fahren	183
Abb. 67: Verteilung der Zielgröße - Leitprozesses und Kabelverlängerung	184
Abb. 68: Verteilung der Zielgröße - Leitprozesses und „Förderkreislauf fahren“	185
Abb. 69: Beispiel alternativer Einsatz Prozessdauer - deterministische Werte	185
Abb. 70: Beispiel Ermittlung der normierten Fälligkeiten verschiedener Prozesse	187
Abb. 71: Ablaufschema Anwendung der Filter zur Rangfolgenbildung	191
Abb. 72: Seiten Prozessmodell	192
Abb. 73: Beispiel Startseite Prozessmodell.....	193
Abb. 74: Startseite - Allgemeine Angaben.....	194
Abb. 75: Beispiel für die Ermittlung der Produktiven Vortriebsdauer	195
Abb. 76: Pop-up Fenster - Abfrage Dokumentation.....	196
Abb. 77: Eingabemaske für die Anlage eines neuen Prozesses	198
Abb. 78: Beispiel - Systembedingte Ausfallzeit - Kontrollvermessung	199
Abb. 79: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - IWEP - Kontrollvermessung.....	200
Abb. 80: Beispiel - Störprozess - Warten auf Vortriebsrohre	201
Abb. 81: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - NWEP - Wartezeit	202
Abb. 82: Beispiel - Störprozess - Betriebsstörung Dehnerstation	203
Abb. 83: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - NWEP - Betriebsstörung	204
Abb. 84: Beispiel - Störprozess - Rettungsübung.....	205
Abb. 85: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - NWEP - Sonstige	206
Abb. 86: Beispiel Prozessmodell - Startseite leer.....	235
Abb. 87: Screenshot Prozessmodell - Seite Prozesse	236
Abb. 88: Screenshot Prozessmodell - Seite Prozessanlage.....	238
Abb. 89: Beispiel Maschinenauswertung / Schichtprotokoll.....	239
Abb. 90: Beispiel Projektbericht / Vortriebsauswertung.....	241
Abb. 91: Beispiel Stillstandauswertung	243

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel Potentialverschiebung - Vorgaben Prozesse.....	36
Tabelle 2: Farbschema Prozesskategorien	46
Tabelle 3: Beispiel für das Kriterium der „technisch einschränkenden Faktoren“.....	142
Tabelle 4: Beispiel Rangfolgenbildung mit vier Filtern	150
Tabelle 5: Parameter Projekt Transportziel Wallring	159
Tabelle 6: Ermittlung und Normierung der Fälligkeit nach Ort (Tunnelmetern)	162
Tabelle 7: Übergeordnete Prozessgruppen Rohrvortrieb	163
Tabelle 8: Beispiele für Prozesse der DWEP-Gruppe Vortriebsprozesse.....	165
Tabelle 9: Beispiele für Prozesse der DWEP-Gruppe Rohreinbauprozesse.....	165
Tabelle 10: Beispiele für Prozesse der IWEP-Gruppe Unterstützungsprozesse.....	166
Tabelle 11: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Wartezeiten	167
Tabelle 12: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Betriebsstörung TBM	167
Tabelle 13: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Betriebsstörung Tunnel.....	167
Tabelle 14: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Betriebsstörung BE	168
Tabelle 15: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Betriebsstörung Separieranlage.....	168
Tabelle 16: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Sonstige NWEP	168
Tabelle 17: Häufigkeiten Prozessdauern - Betriebsstörung Schneidrad.....	181
Tabelle 18: Häufigkeiten Prozessdauern - Kabelverlängerung.....	182
Tabelle 19: Häufigkeiten Prozessdauern - Förderkreislauf fahren.....	183
Tabelle 20: Prozessnummern Prozessmodell Rohrvortrieb.....	189
Tabelle 21: Beispiel für technisch mögliche Parallelprozesse zu ausgewählten IWEP ...	197
Tabelle 22: 7W-Methode	244

Formelverzeichnis

Formel 1: Theoretische Kapazität K_t	21
Formel 2: Nutzbare Kapazität K_n	22
Formel 3: Produktivität	23
Formel 4: Allgemeines Optimierungsmodell (3 Formeln)	64
Formel 5: Beispiel für Optimierungsproblem im Rohrvortrieb	65
Formel 6: Taktzeit bzgl. des Kundenbedarfs	86
Formel 7: Berechnung SA [m] in Abhängigkeit vom Vortriebsort	148
Formel 8: Berechnung der Fälligkeit [%] in Abhängigkeit vom Vortriebsort	149
Formel 9: Berechnung der Wahrscheinlichkeit Fertigstellung des Parallelprozesses	184
Formel 10: Berechnung SA [min] in Abhängigkeit der Vortriebsdauer	187
Formel 11: Berechnung der Produktiven Vortriebsdauer	194
Formel 12: Berechnung der Arbeitstage im Zeitraum t	194

Abkürzungsverzeichnis

#	2D	zweidimensional
	3D	dreidimensional
	4D	Zeitachse und 3D
	5D	Kosten, Zeit und 3D
	5S	Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu und Shikshuke
	5W	5 Warum Methode
	5W2H	deutsch 7W-Methode, Was (What)? Weshalb (Why)? Wo (Where)? Wann (When)? Wer (Who)? Wie (How)? Wie viel (How much)?
	§	Paragraph
	%	Prozent
	>	größer
	≥	größer gleich
	<	kleiner
	≤	kleiner gleich
	∑	Summe
A	Abb.	Abbildung
	Abs.	Absatz
	AF	Anfangsfolge
	AG	Auftraggeber
	Ah	Arbeitsstunden
	AN	Auftragnehmer
	AT	Arbeitstage
B	BIM	Building Information Model(ing)
	BGB	Baugesetzbuch
	BPD	Business Process Diagramm
	BPM	Bauprozessmanagement
	BPMN	Business Process Modeling Notation
	BS	Betriebsstörung
	BSC	Balanced Scorecard
	Bsp.	Beispiel
	bspw.	beispielsweise
	bzw.	beziehungsweise
C	ca.	circa
	CCPM	Critical Chain Project Management / -Projektmanagement
	CCR	Capacity-constrained resource / Kapazitätsbegrenzte Ressource (Engpass)
	CIP	Continuous Improvement Process
	CM	Construction Management
	COB	Construction Operation Board (Baustellenleitstand)
	CONWIP	Constant Work-In-Process
	CPM	Critical Path Method
	DBR	Drum-Buffer-Rope

D	d.h.	das heißt
	DIN	Deutsches Institut für Normung
	DWEP	Direkt Werterzeugender Prozess (siehe auch SP)
E	Ebd.	Ebenda
	EF	Endfolge
	Elek	Elektriker
	EN	Europäische Norm
	et al.	et alii (und andere)
F	FA	Frühester Anfang
	F	Fälligkeit
	f.	folgende Seite
	ff.	fortfolgende Seiten
G	ggf.	gegebenenfalls
	GP	Gesamtpuffer
	GPS	Ganzheitliches Produktionssystem
	GU	Generalunternehmer
H	HOAI	Honorarordnung für Architekten- und Ingenieurleistungen
I	i.d.R.	in der Regel
	IPD	Integrated Project Delivery
	IWEP	Indirekt Werterzeugender Prozess (siehe auch UP)
J	JIT	Just-in-Time
K	KDB	Kunststoffdichtungsbahn
	KF	Kranfahrer
	KPI	Key Performance Indicator
	KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
L	LC	Lean Construction
	LCM	Lean Construction Management
	LM	Lean Management
	LMB	Lean Management im Bauwesen
	LO	Lineare Optimierung
	LP	Leitprozess
	LP	Lean Production, Lean Produktion
	LPDS	Lean Project Delivery System
	LPS	Last Planner® System
	LM	Lean Management
M	m	Meter
	max.	maximal
	Mech	Mechaniker
	MGI	McKinsey Global Institute
	min	Minute
	min.	minimal
	NF	Normalfolge
	NIA	Non-instant availability / Nicht sofort verfügbare Ressource
N	NÖT	Neue Österreichische Tunnelbauweise / Tunnelbaumethode
	NWEP	Nicht-Werterzeugender Prozess (siehe auch StP)
O	OM	Optimierungsmodell
	OR	Operations Research (AE) / Operational Research (BE)

P	PDCA	PDCA-Zyklus / Plan, Do, Check, Act / Planen, Durchführen, Überprüfen, Reagieren
	PERT	Program Evaluate and Review Technique
	PEA	Prozent der erbrachten Arbeiten
	PM	Projektmanagement / Project Management
	POOIGI	Process of Ongoing Improvement / Verbesserungskreislauf
	PPC	Percentage of planned assignments completed
S	SA	Spätester Anfang
	SA	Späteste Ausführung
	S.	Seite
	SchFa	Schildfahrer
	SchFü	Schichtführer
	Schl	Schlosser
	SCM	Supply Chain Management
	Sepa	Separieranlage / Separieranlagenfahrer
	SF	Späteste Fälligkeit
	SFM	Shop-Floor-Management
	SiGeKo	Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinator
	SM	Simulationsmodell
	SM	Schildmaschine
	SM-V4	Schildmaschine Ortsbrust m. Flüssigkeitsstützung
	SMED	Single-Minute-Exchange-of-Die
	SP	Schlüsselprozess (siehe auch DWEP)
	StP	Störprozess (siehe auch NWEF)
	SZ	Summe Stillstandzeiten
T	TBM	Tunnelbohrmaschine
	TFV	Transformations-Flow-Value Model
	TOC	Theory of Constraints
	TPM	Total Production Maintenance
	TPS	Toyota-Produktionssystem / Toyota Production System
	TQM	Total Quality Management
	TVD	Target Value Design
	TVM	Tunnelvortriebsmaschine
U	UP	Unterstützungsprozess (siehe auch IWEF)
	u.a.	unter anderem
V	VD	Vortriebsdauer
	VDI	Verein Deutscher Ingenieure
	vgl.	Vergleich
	VOB	Verdingungsordnung für Bauleistungen
	VPN	Vorgangspfeilnetzplan
	VSM	Value Stream Mapping
W	WIP	Work in Progress
	WSA	Wertstromanalyse
	WSD	Wertstromdesign
	W&F	Fa. Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
Z	z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Bauunternehmen haben den Anspruch, individuelle und komplexe Bauprojekte in einer möglichst kurzen Planungs- und Bauzeit zu realisieren und hierbei den geplanten Kostenrahmen wie auch die bauliche Qualität einzuhalten. Hierbei beabsichtigen die Unternehmen diesen Leistungsanspruch mit größter Effizienz zu erfüllen, wirtschaftlich zu handeln und ihren Gewinn zu maximieren.

Die deutsche Bauwirtschaft hat in den Jahren von 2014 bis 2017 fast 5 % mehr Bauinvestitionen als im Vierjahreszeitraum davor umgesetzt und ein Abfallen der Nachfrage ist nicht in Sicht.¹ Das Bauvolumen in Deutschland erreichte im Jahr 2017 einen Bauwert in Höhe von ca. 370 Milliarden Euro.² Auch bei den öffentlichen Bauinvestitionen ist ein positiver Trend zu erkennen, der sich in einer Steigerung von rund 3,5 % zum Vorjahr niederschlägt. Einen erheblichen Anteil hat mit ca. 60 % hierbei der Tiefbau, der um 5,8 % angestiegen ist.³ Wie in Abb. 1 zu erkennen ist nehmen die Aufträge im Tiefbau in Deutschland seit 2014 deutlich zu.



Abb. 1: Auftragseingang im Tiefbau in Deutschland von 2002 bis 2017⁴

¹ Vgl. ZDB, 2018, S.4.

² Vgl. Statista, 2018.

³ Vgl. ZDB, 2018, S.15.

⁴ Statista, 2018 (3).

Aufgrund der Kombination aus der steigenden Nachfrage und dem Arbeitskräftemangel⁵ müsste die Produktivität der Bauindustrie deutlich ansteigen, um diesem Bedarf gerecht zu werden. Dies ist jedoch nach Studien des McKinsey Global Institute (MGI) nicht der Fall. Vielmehr hat sich die operative Produktivität der Baubranche zwischen 1995 und 2015 nur um durchschnittlich 0,3 % pro Jahr erhöht. Die Produktivität des verarbeitenden Gewerbes hat sich zum Vergleich um 2,0 % pro Jahr erhöht.⁶ Dieser Umstand erscheint erstaunlich, da das technische Know-how und das Projektmanagement weltweit als ureigene Stärke der deutschen Ingenieure, Bauingenieure und Bauunternehmen gelten.⁷

Ein Blick in produktivere Industriezweige kann somit ratsam sein. Denn wie die Bauindustrie heute stand beispielsweise auch die Automobilindustrie vor vielen Jahren vor Produktivitätsproblemen. In diesem Sektor ist die Produktivität stark angestiegen, was zu einem großen Teil mit dem Lean Thinking Ansatz in Zusammenhang gebracht werden kann.⁸ Die Prinzipien des Lean Thinking sind aus den Methoden des Toyota Produktionssystems entstanden. Der primäre Gedanke dieses Systems, wie auch der aller Lean Management Methoden, ist die Verringerung bzw. gänzliche Eliminierung von Verschwendungen. Diese stellen auch in der Baubranche eine Herausforderung dar, weshalb in jüngerer Vergangenheit damit begonnen wurde die Prinzipien des Lean Thinking auf das Bauwesen unter dem Namen Lean Construction⁹ zu übertragen. Zu den **Verschwendungen** können alle Arten von **Planabweichungen** und **nicht-wertschöpfendem Ressourcenverbrauch** gezählt werden. Diese umfassen im Tunnelbau wie in der gesamten Bauindustrie neben den üblicherweise identifizierten und (relativ) offensichtlichen Verschwendungsarten (z.B. hohe Materialbestände auf Baustellen, hohe Mangelquoten, lange Wartezeiten) auch den Umgang mit und das Verhalten bei **Planabweichungen**.

Neben dem hohen Anteil an Verschwendung im Baubetrieb werden als Ursachen für den geringen Produktivitätsanstieg auch die **Projektplanung** und der geringe Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie bzw. digitaler **Hilfsmittel** gesehen.¹⁰ Tatsächlich ist auch ein Zusammenhang der genannten Ursachen zu erkennen. Die Projektplanung umfasst nicht nur die Objektplanung, sondern ebenfalls die zeitliche Planung, die Ressourcenplanung und darüber hinaus auch die Steuerungsplanung, also die Planung von **Handlungsalternativen** und **Standardverfahren** bei Planabweichungen, zur **Vermeidung** von **Verschwendungen**. Ein Mittel zur Steuerung, Kontrolle und Komplexitätsreduzierung stellen strukturierte Daten und Kennzahlen dar.¹¹ Für diese ist die Verwendung von **Informations- und Kommunikationstechnologie** unverzichtbar.

Nur durch effiziente und effektive Prozesse kann die Produktivität optimiert werden,¹² weshalb im Tunnelbau Bauablaufstörungen (= Wartezeiten, Betriebsstörungen) als ein sinnvoller Ansatzpunkt zu sehen sind. In zahlreichen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass

⁵ Wird laut einer Umfrage der Deutschen Industrie- und Handelskammer von Unternehmen des Baugewerbes zu Beginn des Jahres 2018 als größtes Unternehmensrisiko gesehen. Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, 2018.

⁶ Vgl. Stern et al., 2018, S.5 ff.

⁷ Vgl. Womack & Jones, 2015, S.233 ff.

⁸ Vgl. Kaiser, 2013, S.7 f.

⁹ Auch Lean Management im Bauwesen, vgl. Fiedler, 2018, S.X; Hagsheno, 2018, S.XV, S.83.

¹⁰ Vgl. Rein & Schmidt, 2018, S.11 f.

¹¹ Vgl. Langemann, 1999, S.21.

¹² Vgl. Kaiser, 2013, S.7.

insbesondere diese zu den größten Verlustquellen bzgl. der Ausführung von Bauleistungen zu zählen sind.¹³ Thewes & Conrads haben analysiert, dass ca. 60 % der Zeit während eines Tunnelbauprojekts Stillstand herrscht, wobei mehr als 75 % dieser Stillstände ungeplant sind, also Störungen darstellen.¹⁴

Beispielhaft für den Tunnelbau kann der Rohrvortrieb genannt werden, dessen Gesamtkapazität stark von einzelnen Prozessen abhängig ist, insbesondere von der Kapazität (= Geschwindigkeit und Verfügbarkeit) des Vortriebs (= Bodenabbau) und des Rohreinbaus. Um einen kontinuierlichen und effizienten Ablauf der Vortriebs- und Rohreinbauprozesse erreichen zu können und somit die Produktivität des Gesamtprojektes zu steigern, ist es von großer Bedeutung diese nicht-wertschöpfenden und ressourcenbindenden Stillstandzeiten zu reduzieren bzw. sinnvoll (= werterzeugend) zu nutzen. Diese Stillstände werden verursacht durch eine Vielzahl an nur bedingt zu kontrollierenden endogenen und exogenen Einflussgrößen, zu welchen neben der Heterogenität des Baugrundes (= Geologie) die allgemeinen Standortbedingungen wie Raumangebot, Zugänglichkeit, Topologie oder Klima zählen. Aufgrund dieser Einflüsse sind die einzelnen Prozesse gewissen Schwankungen unterworfen, welche sich nicht vermeiden lassen und als normal angesehen werden müssen.¹⁵ Gehen diese jedoch über den zu erwartenden, in der Planung berücksichtigten Schwankungsbereich hinaus und hemmen oder verzögern die vorgesehene Bauleistung, so ist von Störungen zu sprechen.¹⁶ Das Auftreten dieser wird in der Planung anhand von Pufferzeiten versucht zu berücksichtigen. Jedoch ist eine realistische Prognose dieser Störprozesse mithilfe der im Baubetrieb üblichen statischen Planungsmethoden nur unzulänglich möglich.¹⁷

Somit ist aus ihnen zu lernen und in einem ersten Schritt auf diese Störungen zu reagieren. Aufgrund der Komplexität der Bauproduktion ist jedoch selten eine schnelle, flexible und - ganzheitlich betrachtet - optimale Plananpassung möglich. Nahezu alle Möglichkeiten zur **Anpassung des Bauablaufs** im Störfall (= Stillstand der Werterzeugung), in Form von **Beschleunigungsmaßnahmen** sind mit **Mehrkosten**, Qualitätsverlusten und zeitlichen Verzögerungen oder einer Kombination dieser Konsequenzen verbunden. Und auch die Umstellung des Gesamtablaufs wird als problematisch angesehen, da für die Umplanung die notwendige Zeit i.d.R. nicht vorhanden ist.¹⁸ Zum anderen ist kritisch zu sehen, dass die Ablaufumstellungen auf der Erfahrung von Personen beruhend intuitiv erfolgen. Ursache für diesen Umstand ist, dass für die Reaktionen auf Störungen kaum Hilfsmittel vorhanden und die steuernden Reaktionen nicht standardisiert (= geplant) sind.¹⁹ In einem Gewerbe, welches auf sehr präziser Planung, (Ver-)Messung und Kontrolle basiert, wie es der Tunnelbau ist, ist die Möglichkeit zur subjektiven Entscheidung von Ablaufanpassungen fragwürdig.

¹³ Vgl. Vygen et al., 1998, S.113.

¹⁴ Vgl. Thewes & Conrads, 2017, S.2. Bei der Untersuchung handelt es sich um Tunnelvortriebe im Tübbingausbau. Eine erste Auswertung von Rohrvortriebsprojekten ergab etwas geringere Stillstandzeiten. Der Stillstand betrug hier nur ca. 33 % der Zeit, die sich in 36 % geplante und 64 % ungeplante Stillstände aufteilen. Siehe hierzu Anlage 4: Projektbericht / Vortriebsauswertung (beispielhafter Auszug).

¹⁵ Vgl. Bauer, 2007, S.753.

¹⁶ Vgl. Vygen et al., 1994, S.73.

¹⁷ Vgl. Conrads et al., 2017, S.166.

¹⁸ Vgl. Bauer, 2007, S.761.

¹⁹ Vgl. Korndörfer & Wittenbrink, 2018, S.3 f.

Die kurzfristige Anpassung des Ablaufes stellt jedoch eine große Chance für die Produktivitätsoptimierung dar. In einem Störfall (Stillstand) entsteht aufgrund der neuen Randbedingungen Potential in Form von ungenutzten Ressourcen (Personal, Maschinen, Zeit, etc.), welches ursprünglich für den ausfallenden bzw. gestörten Prozess eingeplant war. Bei der Umstellung des Gesamtablaufs erfolgt also eine Anpassung durch **Potentialverschiebung**. Nicht nur die Störung selbst, sondern auch die Nicht-Nutzung dieses Potentials ist als eine Verschwendung (zeitlich und monetär) zu sehen, die durch eine steuernde Reaktion zu vermeiden ist.

Damit diese Reaktion auf eine Störung standardisiert, in kurzer Zeit²⁰ und den Gesamtprozess einbeziehend erfolgen kann, sind digitale Hilfsmittel notwendig. Das Fehlen dieser und der geringe Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien sind als Teil des allgemeinen langsamen Fortschritts im Bereich der Digitalisierung der Bauindustrie in Deutschland zu sehen. Digitale Methoden und schlanke Prozesse, welche die Entwicklung anderer Branchen vorangebracht haben, aber auch moderne Planungssoftware im Bau, sollten zusammen als Teil des Lösungsansatzes für das Produktivitätsdefizit gesehen werden.²¹

Schwankungen und Störungen im Baubetrieb sowie daraus entstehende Stillstände im Bauablauf sind nie vollständig zu verhindern. Um die Produktivität unter diesen Bedingungen zu optimieren, indem die Verschwendungen verringert werden, ist es sinnvoll die Reaktionen auf Störungen zu standardisieren (= Steuerungsprozesse und Standardverfahren), dem während eines Stillstandes entstandenen Potential agil zu begegnen und dieses durch den Einsatz von (digitalen) Hilfsmitteln optimal zu nutzen.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Der Tunnelbau ist ein hochtechnologisches Gewerbe. Vorwiegend jedoch in Bezug auf die Tunnelkonstruktion, die Erfassung der Geologie und die Entwicklung der Maschinen, weniger im Umgang mit Planabweichungen und der Ablaufsteuerung. Und auch die ersten Anwendungen der Lean Construction Methoden im Tunnelbau beziehen sich hauptsächlich auf die Verbesserung der planbaren Produktion (= Vortriebsarbeiten)²², der Ablaufplanung (= Taktung)²² und der einzelner Arbeitsschritte (z.B. Rohrwechsel)²³. Probleme und Störungen, die sich auf den Vortrieb auswirken, werden hingegen mit traditionellen Methoden versucht zu beheben. Das Unternehmen Fa. *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG* konnte bestätigen, dass Hilfsmittel notwendig sind, um gezielter und standardisierter auf Störungen im Bauablauf reagieren zu können.²⁴ Eine solche Unterstützung soll es dem verantwortlichen Baustellenpersonal ermöglichen, seine Kapazitäten auf die proaktive Planung zu konzentrieren, anstatt diese für die notwendigen Umplanungen zu verbrauchen.

Bezugnehmend auf die Ausgangssituation stellt die vorliegende Arbeit den Umgang mit außerplanmäßigen Situationen (Störungen) innerhalb des Bauablaufs im Tunnelvortrieb in das Zentrum der Betrachtungen. Aus dieser Ausrichtung können ein Forschungsziel und

²⁰ Vgl. Maidl & Stascheit, 2014. Ziel ist die Analyse der Projektleistung in Echtzeit.

²¹ Vgl. Stern et al., 2018, S.5 ff.

²² Vgl. Engelhardt et al., 2018, S.3 ff., vgl. Schaefer, 2016, S.10 ff.

²³ Vgl. Schaefer, 2016, S.10 ff.

²⁴ Vgl. Korndörfer & Wittenbrink, 2018, S.3 f.

Forschungsfragen sowie geeignete Forschungsmethoden zur Beantwortung dieser Fragen abgeleitet werden.

Beim Umgang mit Störungen innerhalb des Bauablaufes treten Probleme und unsystematische Vorgehensweisen als Reaktion auf diese auf. Ziel der Arbeit ist es, eine methodische Vorgehensweise und Handlungsanweisungen für den gezielten Umgang mit Störungen im Bauablauf zu entwickeln, um die Kapazität des Gesamtvortriebs zu steigern und damit eine Optimierung der Produktivität zu erreichen.

Aus diesem Grund soll ein Hilfsmittel erarbeitet werden, mit dem die Produktivität eines Tunnelvortriebs und speziell eines Rohrvortriebs gesteigert werden kann.

Außerplanmäßige Situationen (Stillstände) lassen sich im Bauprozess aufgrund der Besonderheiten der Branche häufig nicht vermeiden. Jedoch werden die Möglichkeiten, wie diese Störungen minimiert werden können, wie die Auswirkungen dieser Störungen betrachtet werden, wie kurzzyklisch aus diesen Störungen gelernt werden kann und wie optimal auf diese Störungen reagiert werden kann, zu wenig untersucht und genutzt. Bereits vor Beginn eines Projektes kann bestimmt werden, auf welche Prozesse besonderer Wert gelegt werden muss, um termingerecht bzw. am wirtschaftlichsten zu arbeiten. Dabei ist jeder einzelne Prozess im ganzheitlichen Ansatz zu betrachten. Mit Hilfe der während der Stillstände gewonnenen Daten und Informationen ist zum einen die Gesamtdauer der Stillstände zu reduzieren und zum anderen ist die Zahl der ungeplanten Stillstände insgesamt zu verringern.

Mit der Entwicklung eines Prozessmodells für den Produktionsablauf von Tunnel- bzw. Rohrvortriebsprojekten, soll eine fundierte Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt werden, anhand derer auf außerplanmäßige Situationen reagiert werden kann, damit die Gesamtprozessproduktivität unter den gegebenen Bedingungen optimiert wird. Mit diesem Prozessmodell soll die folgende Forschungsfrage beantwortet werden:

**Ist es möglich, im Falle einer Störung,
die Prozessabfolge kurzfristig umzustellen,
um die Gesamtprozessproduktivität zu optimieren?**

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage und zur Umsetzung der Zielstellung bzgl. der Produktivitätsoptimierung sind Vorgehen zur Identifizierung von Schlüsselprozessen und von Prozessen mit dem maßgebenden Einfluss auf die Gesamtprozessproduktivität zu bestimmen. Um dies zielführend umzusetzen, sind systematische Entscheidungskriterien, standardisierte Handlungsanweisungen und standardisierte Vorgehen zur Dokumentation - insbesondere von außerplanmäßigen Situationen - zu entwickeln. Zudem sind Kriterien zu bestimmen, welche das Prozessmodell zu erfüllen hat, um die folgenden, vorherrschenden Probleme zu beheben:

- Umplanung und Umstellung der Prozessabfolge zu zeitintensiv (Einfachheit).
- Konzentration auf Einzelprozessoptima - nicht auf Gesamtprozessoptimum (Ganzheitlichkeit, Prozessorientierung).
- Unikatcharakter von Projekten erschwert die Anpassung (Flexibilität).
- Präferenzen der Zielerreichung sind individuell (Transparenz, Anpassbarkeit).

1.3 Abgrenzung und Stand der Forschung

Die Fülle von Bauprojektarten hinsichtlich der Projekteigenschaften, der Nutzungsart, der notwendigen Leistungen etc. und die Vielfältigkeit der Vortriebsarten bei Tunnelprojekten bzw. Rohrvortriebsprojekten macht es erforderlich, für die weitere Bearbeitung eine Eingrenzung des zu untersuchenden Systems und des Untersuchungsgegenstandes vorzunehmen. Das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell soll so gestaltet werden, dass es auf verschiedene Vortriebsarten des Tunnelbaus sowie auch auf andere Projektarten, wie beispielsweise den Hochbau, adaptierbar ist. Erste Ansätze, wie die zu berücksichtigenden Besonderheiten des Sprengvortriebs, werden dargelegt. Das Prozessmodell wird in erster Linie für ein Rohrvortriebsprojekt entwickelt, weshalb der Fokus der Arbeit auf diese Projekt- bzw. Vortriebsart gelegt wird. Die Prinzipien und Vorgehen werden so allgemein wie möglich aufgestellt, die sehr spezifische Untersuchung der Rohrvortriebsprozesse ist für eine zielführende und anwendbare bzw. validierbare Modellentwicklung jedoch unumgänglich. Bei dieser Modellentwicklung sollen zudem verschiedene Methoden und Prinzipien aus dem Lean Thinking bzw. Lean Construction Bereich berücksichtigt werden, um deren produktivitätsverbessernde Wirkung hilfreich einzusetzen.

Die Adaption und Implementierung von Lean-Prinzipien in den Bauprozess ist bereits seit einigen Jahren Teil der ingenieurwissenschaftlichen Forschung im Bereich des Baubetriebs und des Baumanagements. Ebenso ist die Optimierung der Produktionsprozesse und der Gesamtprozessproduktivität bei Tunnelvortrieben in unterschiedlichen Ausprägungen Bestandteil aktueller oder bereits abgeschlossener Forschungsvorhaben. Die folgenden Forschungsarbeiten werden hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeiten und der Abgrenzungen bzw. Ansatzpunkte zur vorliegenden Arbeit vorgestellt:

- Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme (Kirsch, 2009)
- Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung (Kaiser, 2013)
- Ein ganzheitliches Verfahrensmodell als neuer Ansatz in der Produkt- und Fertigungsplanung im Hochbau (Hermes, 2017)
- Optimierung von Produktionsprozessen nach LEAN-Prinzipien unter Berücksichtigung von Störungen (Wasemann, 2017)
- Digitale Optimierung der Bauplanung (Backhaus, 2018)
- Prozesssimulation für die Leistungsermittlung und -planung beim maschinellen Tunnelbau (Thewes & Conrad, 2017)
- Evaluation of productivities influenced by disturbances and different soil compositions in microtunneling using process simulation (Dang et al., 2018)

1.3.1 Forschungsarbeit zur Implementierung von Lean Methoden in der Bauproduktion

Bauproduktionsorganisation nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme

Die Forschungsarbeit von *Kirsch* befasst sich mit der Adaption von industriellen Planungs- und Produktionssystemen, deren Gestaltungsprinzipien und Methoden auf die Bauprojekt- abwicklung und die Bauproduktion übertragen werden, um die Wertschöpfung zu steigern. Hierbei stellt *Kirsch* heraus, dass der Erfolg eines Produktionssystems nicht in der Optimierung seiner einzelnen Elemente und dem Einsatz einzelner Methoden liegt, sondern vielmehr im ganzheitlichen Zusammenwirken dieser. Es wird ein ganzheitliches Bau-Produktionssystem entwickelt, welches die „Lean-Elemente“ Arbeits- und Prozessorganisation, Just-in-Time, Kontinuierliche Verbesserung, Qualität, robuste Prozesse, Arbeitsroutinen, Standardisierung und Visualisierung berücksichtigt und auf die Bauwirtschaft überträgt.²⁵

Der Ansatzpunkt der vorliegenden Arbeit lässt Gemeinsamkeiten mit den Zielen der Forschungsarbeit von *Kirsch* erkennen. Zum einen ist der gesamtheitliche Ansatz ebenfalls das Ziel des entwickelten Prozessmodells. Zum anderen werden auch bei der Entwicklung des Prozessmodells verschiedene Lean-Elemente eingebunden und adaptiert, sowie deren Mehrwert für die Bauproduktion genutzt. Der Fokus der Arbeit von *Kirsch* liegt jedoch nicht auf den einzelnen Prozessen und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem, sondern auf der Analyse und der Behebung der verschiedenen Kernprobleme in der Projektabwicklung und Projektorganisation, wie der Mitarbeiter und NU-Koordination, der Ablaufplanung oder der Materialbeschaffung.

Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung

Kaiser führt in seiner Forschungsarbeit ein Bauprozesssystem ein, für welches das Lean Management die Grundlage bildet. Aus diesem leitet *Kaiser* verschiedene Prinzipien ab, um die beim Bauablauf auftretenden Verschwendungen zu eliminieren, die Bauproduktion zu verschlanken und eine kontinuierliche Verbesserung des operativen Bauprojektmanagements zu erreichen.²⁶

Als gemeinsamer Ansatzpunkt zu der Forschungsarbeit von *Kaiser* kann das Bestreben der Adaption verschiedener Prinzipien des Lean Managements und das Ziel der Verschwendungsverringerung und der kontinuierlichen Verbesserung der Bauprozesse gesehen werden. Die Zieldimension orientiert sich ebenfalls in dieselbe Richtung. Auch *Kaiser* ist bestrebt, mit seinem System die Effizienz der Prozesse mit Blick auf die Wertschöpfungskette zu steigern und dabei eine Transparenz der Abläufe zu erzeugen. Zudem soll sich das von *Kaiser* entwickelte System durch seine Flexibilität auszeichnen, um auf die komplexen und dynamischen Prozesse in der Bauprojekt- abwicklung reagieren zu können.

Kaiser's Forschungsfokus liegt jedoch auf einem übergeordneten Ausführungssystem, mit dem er standardisierte Prozessabläufe, klare Regeln für den Aufbau der Projektorganisation, eine taktbasierte Zeitplanung und einen standardisierten Verbesserungsprozess einführt. Es werden sowohl Ziele wie auch Methoden und Grundsätze der Bauprojektorganisation betrachtet.

²⁵ Vgl. Kirsch, 2009, S.1 ff.

²⁶ Vgl. Kaiser, 2013, S.5 ff., S.82 ff.

1.3.2 Forschungsarbeit zur Adaption von Lean Techniken zur Prozessoptimierung

Optimierung von Produktionsprozessen nach LEAN-Prinzipien unter Berücksichtigung von Störungen

Insbesondere der Tiefbau und seine Bauablaufproduktivität werden durch die sich ständig verändernden Baugrundverhältnissen, Witterungseinflüssen und der Änderung der Bauabläufe geprägt. Die Prozessstabilität der Bauproduktion ist hierbei von großer Bedeutung für die Produktivität, die Qualität und die Termintreue. Um diese zu erhöhen, wurde von *Wasemann* ein generisches Prozessmodell einer Bauproduktion entwickelt.

Das Modell wurde nach einem objektorientierten Ansatz in das Programm MATLAB implementiert. Mit Hilfe des entwickelten Modells soll es möglich sein, die Folgen von Störungen zu antizipieren und somit die Bauprozesse bzgl. ihrer Prozessstabilität zuverlässiger planen zu können. Das Programm erlaubt eine ideale Simulation der Zeit-, Kosten- und Ressourcenberechnung von Bauprozessen. Da diese gewissen Schwankungen unterliegen und nicht exakt vor auszuplanen sind, wurde eine Erweiterung des Modells programmiert, welche auf Berechnungen beliebig vieler Parametervariationen durch eine Monte-Carlo Simulation unter Gebrauch von Zufallswerten einer Normalverteilung basiert. Anhand dieser ist es möglich, stochastische Aussagen über die Gesamtprozessstabilität und Sensitivität hinsichtlich möglicher Störungen zu treffen. Die Ergebnisse können als eine Art Bewertungsfunktion der geplanten Bauprozesse bzgl. der Solldauer und Sollkosten angesehen werden, unter Einbeziehung derer die zukünftigen Prozesse genauer geplant werden können.²⁷

Als gemeinsamer Ansatzpunkt der Entwicklung des Prozessmodells und der Forschungsarbeit von *Wasemann* zu sehen ist das Bestreben, die Produktivität der Bauproduktion zu steigern, indem die externen Einflüsse, wie die Witterung oder die Baugrundverhältnisse, Berücksichtigung finden. Der Ansatz von *Wasemann* ist allerdings objektorientiert und die Folgen von Störungen sollen vorweggenommen werden, wohingegen mit dem Prozessmodell zukünftige potentielle Störprozessursachen erkannt und kurzfristig bereits während verfügbarer Stillstandzeiten präventiv kontrolliert, verhindert bzw. behoben werden sollen.

Digitale Optimierung der Bauplanung

Backhaus hat ein theoretisches, prozessorientiertes Modell für ein Produktionssystem für Baustellen entwickelt, welches der Implementierung von Lean Construction dienen soll. In diesem fasst er einzelne Prozesse als Produktionssysteme auf. Diese sind zum einen voneinander abhängig und zum anderen werden sie durch äußere, schwer kontrollierbare exogene und dem System eigene endogene Einflussfaktoren beeinflusst. Dieses Modell hat *Backhaus* nach der Metra-Potential-Methode objektorientiert in MATLAB implementiert und hierbei einen schlingenfreen, gerichteten, schlichten Graphen erstellt, dessen Knoten durch eine Menge homogener, binärer Relationen miteinander verknüpft sind. Diese Modellierung erlaubt es, die Prozesse beliebig fein aufzugliedern. So kann bspw. auf der obersten Ebene der Prozess „Baugrube erstellen“ stehen, welcher sich auf der Subebene in die Prozesse „Mutterboden entfernen“, „Grube ausheben“ und „Grube sichern“ unterteilen lässt. Je nach Problemstellung können somit unterschiedliche Dimensionen der Bauprozesse und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem untersucht werden. Anhand von Monte-Carlo Simulationen lassen sich - unter Berücksichtigung der Bauproduktionsfaktoren

²⁷ Vgl. Wasemann, 2017.

als Zufallsvariablen - statistische Bauzeitenschätzungen für eine Vielzahl an möglichen Szenarien berechnen. Bei ausreichend vielen Berechnungen ergibt sich so eine Verteilungskurve von der Gesamtbauzeit, welche statistisch ausgewertet werden kann. Somit können bereits während der Planung Risiken aber auch Chancen berücksichtigt, statistisch beziffert und gezielt gefördert werden.²⁸

Ebenso wie bei *Wasemann* ist auch bei *Backhaus* ein gemeinsamer Ansatzpunkt im Bestreben der Produktivitätssteigerung zu sehen. Dies soll bei *Backhaus* wie in der vorliegenden Arbeit anhand der Implementierung von verschiedenen Methoden des Lean Construction erreicht werden. Der Ansatz von *Backhaus* ist jedoch ein objektorientierter und die Modellierung erfolgt anhand einer sehr feinen Gliederung der Prozesse. Die Auswirkungen verschiedener Prozesse auf das Gesamtsystem sollen dabei zur Berücksichtigung von Chancen und Risiken dienen. Mit dem Prozessmodell werden hingegen zukünftige Störprozessursachen bzgl. ihres potentiellen Einflusses untersucht und falls möglich kurzfristig während außerplanmäßiger Stillstandzeiten präventiv kontrolliert, verhindert bzw. behoben, um ihren zukünftigen negativen Einfluss zu verhindern und somit die Gesamtprozessproduktivität unter den außerplanmäßigen Bedingungen zu erreichen.

1.3.3 Forschungsarbeit zur Prozessoptimierung im maschinellen Tunnelbau anhand von Prozesssimulationen

Prozesssimulation für die Leistungsermittlung und -planung beim maschinellen Tunnelbau

Wie *Thewes & Conrads* darstellen, ist eine Steigerung der Vortriebsleistung und damit der Produktivität eines maschinellen Tunnelvortriebs nicht nur durch die Erhöhung der Vortriebsgeschwindigkeit oder eine Beschleunigung der weiteren notwendigen Arbeiten zu erreichen, sondern insbesondere durch die Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Logistikkette und die Reduzierung der Stillstandzeiten. Die Wartung der Abbauwerkzeuge und die dafür notwendigen Arbeiten in der Abbaukammer sind zeitintensiv und führen zu ungeplanten Stillständen. Der Tunnelbau wird von vielen verschiedenen Einflüssen geprägt und die unsicheren Randbedingungen erlauben keine / kaum eine realistische Prognose der Wartungsprozesse mithilfe der im Baubetrieb üblichen statischen Planungsmethoden. *Thewes & Conrads* haben eine Prozesssimulation erstellt, um die einzelnen Logistik- und Wartungsvorgänge und deren komplexe Wechselwirkung zu modellieren, zu analysieren und zu planen. Die Stillstandzeiten machen etwa 60 % der Projektzeit aus, wovon nur ca. ein Viertel auf geplante Wartungen entfällt. Bisher wurden diese Leistungsschwankungen und die Abhängigkeiten der einzelnen Systemkomponenten zu isoliert betrachtet. Mit Hilfe des entwickelten Modells können ganzheitliche (optimale zeitliche Einplanung) Strategien für die Inspektionen und Wartungen entworfen und bewertet, und somit die Produktivität des Gesamtsystems gesteigert werden.²⁹

Gemeinsamkeiten zur Forschungsarbeit von *Thewes & Conrads* zur vorliegenden Arbeit lassen sich in der Zielausrichtung erkennen. So ist das Ziel der Prozessmodellentwicklung ebenfalls die Steigerung der Gesamtprozessproduktivität, insbesondere durch die Reduzierung der Stillstandzeiten. *Thewes & Conrads* setzen einen Fokus auf eine ganzheitliche, also optimale zeitliche Ausführung von Wartungs- bzw. Inspektionsarbeiten. Allerdings werden diese, wie auch die Logistkarbeiten, bereits in der Planung miteinbezogen, basierend

²⁸ Vgl. Backhaus, 2018.

²⁹ Vgl. Thewes & Conrads, 2017.

auf Prognosen, die anhand von Prozesssimulationen aufgestellt werden. Das Prozessmodell grenzt sich in diesem Bereich von der Forschungsarbeit von *Thewes & Conrads* ab, da bei diesem die zum Zeitpunkt eines außerplanmäßigen Stillstandes möglichen Prozesse - wie bspw. Wartungsprozess - kurzfristig anhand der anzutreffenden Baustellensituation, den gegebenen Randbedingungen und der Erfahrungsdaten eingeplant werden. Die Verwendung einer Prozesssimulation ist eine hervorragende Methode, um eine stabile Prozessplanung zu erreichen. Eine Erweiterung des Prozessmodells um die Einbeziehung der in einer vergleichbaren Prozesssimulation gewonnenen Wartungsfälligkeit und Auftretenswahrscheinlichkeit von Störungen ist somit als äußerst sinnvoll anzusehen.

Evaluation of productivities influenced by disturbances and different soil compositions in microtunneling using process simulation

Dang et al. untersuchen die Verwendung einer operativen Prozesssimulation zur Analyse von Störungen und beeinflussenden Faktoren auf den Tunnelvortrieb. Sie stellen dar, dass die Vorgänge beim Microtunnelbau ein komplexes Zusammenspiel verschiedener Prozesse, einer Vielzahl von unterstützenden Geräten und persönlicher Erfahrung darstellen. Hierbei führen Ausfälle von kritischen Prozessen direkt zu einer geringeren Produktivität. *Dang et al.* sehen in der Verwendung von operativen Prozesssimulationen eine Möglichkeit, um die Planung und den Betrieb Tunnelvortriebsprojekten positiv zu beeinflussen, indem die möglichen Risiken bzw. Probleme für die einzelnen Bauphasen berechnet und analysiert werden. Hierbei werden die Konsequenzen verschiedener Entscheidungen prognostiziert. Außerdem sollen mithilfe der Prozesssimulation der Einsatz von Ressourcen, die Kosten und die Projektdauern optimiert werden.³⁰

Gemeinsamkeiten zur Forschungsarbeit von *Dang et al.* zur vorliegenden Arbeit lassen sich in der Zielausrichtung erkennen. Das Ziel ist die Entwicklung eines anpassungsfähigen Modells für den (Micro-)Tunnelbau, welches sich auf die werterzeugenden Prozesse fokussiert. Hierbei sind auch *Dang et al.* bestrebt durch die Prozessanalyse die Faktoren, welche die Produktivität im besonderen Maße beeinflussen, zu identifizieren.

Allerdings beziehen *Dang et al.* die Bodenverhältnisse und deren Einfluss auf die Produktivität mit ein. Zudem werden die Prozesse in ein Systemsprachenmodell (SysML) übersetzt, wodurch die Auswirkungen der Störungen der unterschiedlichen Bodenverhältnisse beurteilt werden können, mit dem Ziel die Tunnelvortriebsgeschwindigkeit für verschiedene Szenarien vorhersagen zu können. Das Modell bietet somit eine Möglichkeit, um eine stabile Prozessplanung erreichen zu können. Ob eine praktische Anwendung des Modells auf der Baustelle, um kurzfristig auf Störungen der Prozesse reagieren zu können, bleibt zu prüfen. Jedoch ist eine Implementierung des Simulationsmodells von *Dang et al.* in das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell denkbar. Auf diese Weise könnten Prognosen zur Wirkung bestimmter Ausweichprozesse kurzfristige ermittelt und zur Verfügung gestellt werden.

³⁰ Vgl. *Dang et al.*, 2018

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die Forschungslogik der vorliegenden Arbeit gründet auf den relevanten Problemen der Baupraxis. Basis bildet ein kontinuierlicher Wissensaustausch zwischen Theorie und Praxis, sodass sich die Forschungsgrundlagen aus einem sich wechselnden und ergänzenden deduktiven und induktiven Vorgehen ergänzen. Der Lösungsweg orientiert sich vorrangig an einem deduktiven Prozess, der sich durch die Analyse von theoriegeleiteten Passagen aus verschiedensten Quellen des Baumanagements, des Tunnelbaus und des Lean Managements begründet und der Arbeit den allgemeinen Bezugsrahmen vorgibt. Dieser theoretische Input wird auf Basis von praktischen Anwendungsfällen und deren Schlussfolgerungen validiert. Die induktive Vorgehensweise ist darin begründet, dass die Erkenntnisse einzelner Anwendungen im Kontext dieser Arbeit insbesondere in den sozio-technischen Systemen von Bauprojektorganisationen als Definition von allgemeingültigen Theorien dienen. Auf die Validierung, die praxisnahe Problemanalyse und Lösungserarbeitung sowie auf den regen Austausch mit der Fa. *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG* wird aus diesem Grund ein besonderer Wert gelegt.

Der Gang der Arbeit lässt sich wie folgt skizzieren, das Ablaufschema ist in Abb. 2 dargestellt:

Nachdem in **Kapitel 1** Ausgangssituation, Problemstellung, Praxisrelevanz, Motivation und Forschungsfragen herausgearbeitet worden sind, beschäftigt sich **Kapitel 2** mit den wissenschaftstheoretischen Grundlagen der Bauproduktion, des Bauablaufs und des Bauprozessmanagement, um mögliche Ansatzpunkte für die Produktivitätssteigerung herauszustellen.

Kapitel 3 strukturiert die im vorherigen Kapitel gewonnenen Informationen mit Blick auf das angestrebte Prozessmodell, führt notwendige Definitionen ein und ordnet den Ansatzpunkt der Lösung in die Problemstellung ein. Hierzu werden die Ziele, welche mit dem Prozessmodell erreicht werden sollen, ausführlich hergeleitet.

Um das Prozessmodell zielführend entwickeln zu können, werden im **Kapitel 4** die Grundlagen und das Vorgehen für diese Entwicklung sowie die Anforderungen herausgearbeitet.

Da die Methoden und die Werkzeuge des Lean Managements auf das Prozessmodell adaptiert werden sollen, beschäftigt sich das **Kapitel 5** eingehend mit der Entwicklung des Lean Gedanken, den Lean-Methoden, dem aktuellen Stand der Technik des Lean Construction Managements und den ersten Ansätzen diese Techniken im Tunnelbau zu implementieren.

Kapitel 6 bearbeitet folglich die Grundlagen des Tunnelbaus, um die Begrifflichkeiten, Vorgehen und Potentiale dieses Bereichs darzustellen. Die Entwicklung des Prozessmodells fokussiert sich hauptsächlich auf die Anwendung im Rohrvortrieb. Jedoch soll die Nutzung

dieses Hilfsmittels auch in andere Tunnelbauverfahren möglich sein, weshalb an dieser Stelle zusätzlich die Grundlagen zum Sprengvortrieb dargelegt werden.

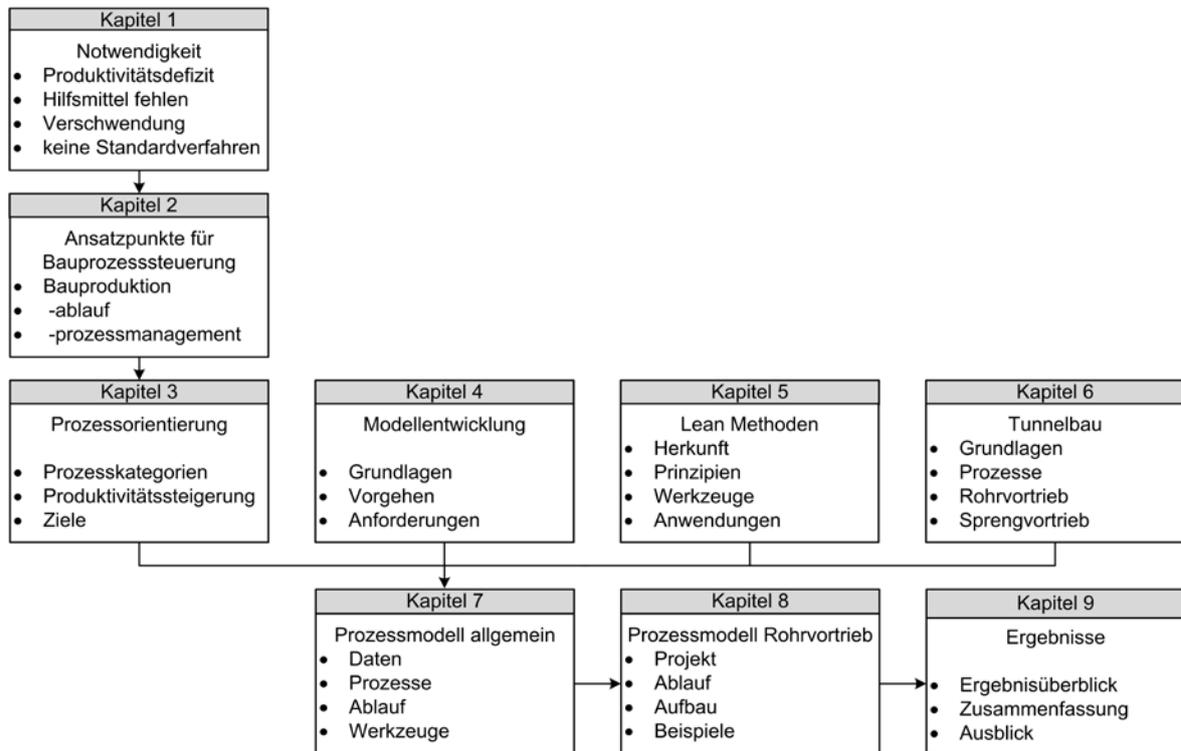


Abb. 2: Ablaufschema zur Gliederung

Den Kern der Arbeit bilden das Kapitel 7 sowie das Kapitel 8. Im **Kapitel 7** werden die aus den vorherigen Kapiteln erarbeiteten und gesammelten Informationen, Techniken, Vorgehen, Ziele und Anforderungen in der Entwicklung eines allgemeinen, prozessorientierten Modells zusammengeführt. Dieses wird im **Kapitel 8** spezifisch auf den Rohrvortrieb ausgerichtet und die Anwendbarkeit an einem realen und anschaulichen Projektbeispiel validiert.

Die in den Untersuchungen gewonnenen Ergebnisse werden im **Kapitel 9** mit Bezug auf die gestellte Forschungsfrage beschrieben und ein Ausblick auf die nötigen folgenden Schritte, die zukünftige Weiterentwicklung des Prozessmodells und den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Die vorliegende Arbeit wird wie folgt aufgebaut (vgl. Abb. 3):

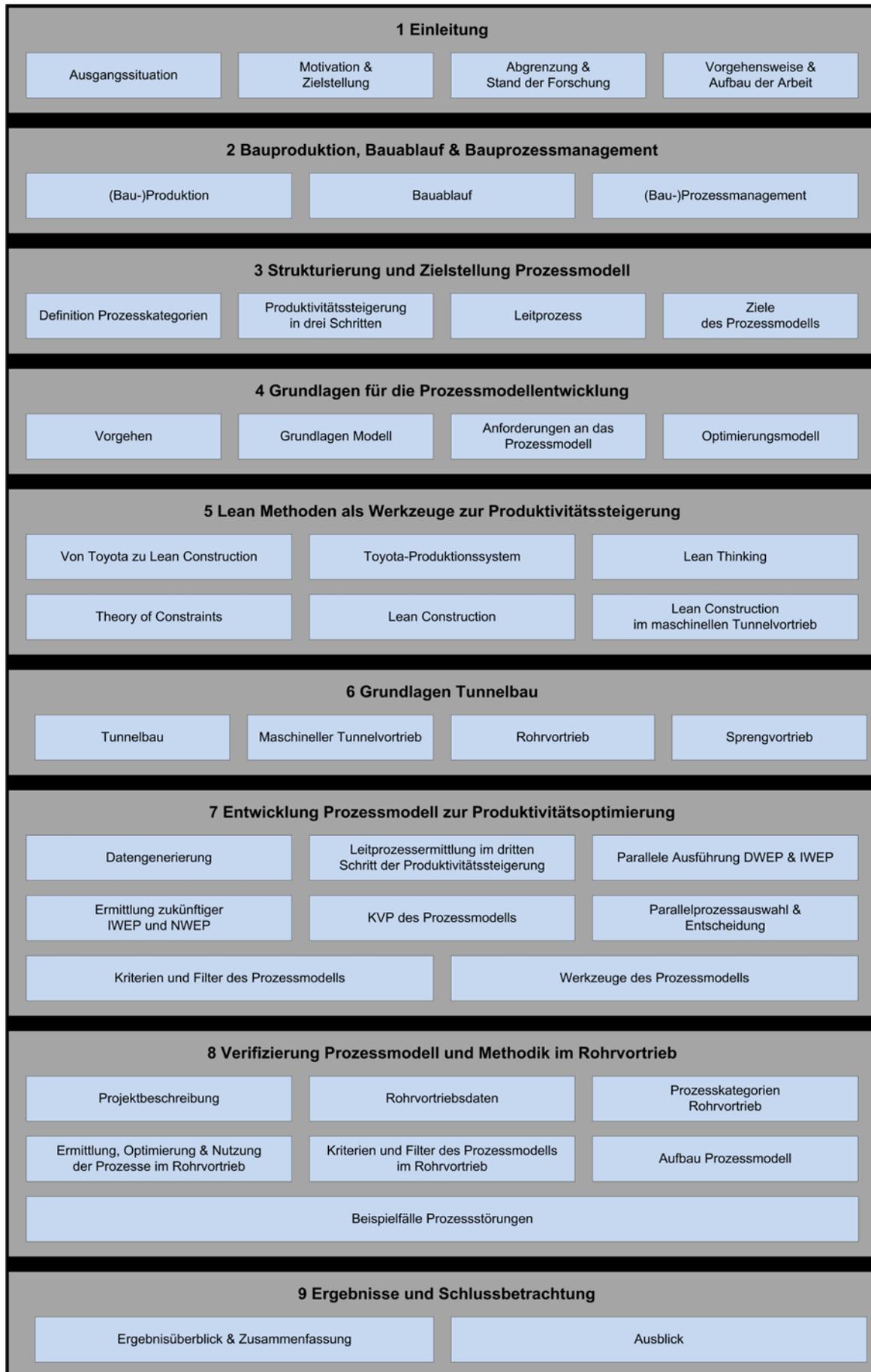


Abb. 3: Aufbau der Arbeit

2 Bauproduktion, Bauablauf und Bauprozessmanagement

Allen Bauproduktionen und somit auch dem Tunnelbau ist während der ersten Projektphasen gemein, dass ein Soll-Ablauf definiert wird, um das Projektziel (= Bauvorhaben) zu erreichen. Dieses übergeordnete Ziel beinhaltet die Leistungserbringung des vom Kunden geforderten Wertes (= Qualitätsanspruch) sowie der kostenmäßigen und terminlichen Optimierung dieses Wertschöpfungsprozesses. Für die in die Zukunft gerichtete Planung des Soll-Ablaufs werden Annahmen bzgl. der auftretenden Randbedingungen und Einflüsse getroffen, welche während der Bauausführung nur selten mit den dann tatsächlich anzutreffenden Bedingungen übereinstimmen. Um diese Abweichung zwischen der Planung und der Realität zu harmonisieren, ist eine gezielte Bauproduktionssteuerung und für diese ein Verständnis für die auftretenden Prozesse notwendig.

Für diesen Zweck werden im ersten Unterkapitel die Eigenschaften, die Einflussgrößen bzw. Teilbereiche (= Bauproduktionsfaktoren), die Möglichkeiten (= Kapazität, Potential) der Bauproduktion und die Optimierungsmöglichkeiten dargestellt.

Darauf aufbauend werden im zweiten Unterkapitel die potentiellen Ansatzpunkte zur Bauproduktionssteuerung (= Ablaufplanung, Detailterminplanung), die Möglichkeiten zur grafischen und systematischen Darstellung dieser Planung, sowie die Formen, Ursachen und Gegenmaßnahmen von Unsicherheiten und Störungen der Prozesse bzw. des Bauablaufs betrachtet.

Das Bauprozessmanagement bzw. der prozessorientierte Ansatz, die Beschreibung und Unterteilung der im Bauprozessmanagement auftretenden Prozesse werden im letzten Unterkapitel als Grundlage für das anschließende Kapitel erläutert.

2.1 Produktion und Bauproduktion

Die Produktion eines Bauwerks ist stark arbeitsteilig und komplex. In den verschiedenen Phasen eines Bauprojekts (bzw. Bauobjekts) sind Planungs-, Beratungs-, Bau- und Baudienstleistungen zu erbringen. Es handelt sich um ein Gemeinschaftswerk vieler verschiedener Fachleute und der Gesellschaft. Somit sind die Kommunikation und das qualifizierte Handeln entscheidende Faktoren für den Erfolg der Produktion.³¹

Ein Bauprojekt hat das Ziel, ein einzigartiges Bauwerk an einem bestimmten, einzigartigen Ort mit individuellen Voraussetzungen, in einer bestimmten Zeit, unter bestimmten Rahmenbedingungen und mit begrenzten Ressourcen zu erstellen.³² Es handelt sich somit um eine temporäre und einzigartige Produktionsstätte. Im Folgenden wird dargestellt, was unter einer Produktion zu verstehen ist, was die Besonderheiten der Bauproduktion im Vergleich zur stationären Industrie sind, welche Faktoren bei der Bauproduktion eine Rolle spielen und wie die Kapazität und das Potential eines Prozesses bzw. eines gesamten Bauprojektes definiert und bemessen werden. Diese Grundlagen sind bedeutend für die Übertragung der Lean Prinzipien aus der stationären Industrie auf die Bauproduktion und für die Ansatzpunkte der Prozessmodellentwicklung und -implementierung.

³¹ Vgl. Motzko, 2013, S.3.

³² Vgl. ebenda, S.4.

2.1.1 Produktion und System

Die Aufgabe einer Produktion „ist der betriebliche Transformationsprozess, in dem die beschafften Werkstoffe zu neuen Produkten transformiert und kombiniert werden.“³³

Definition Produktion

„Unter (industrieller) Produktion versteht man die Erzeugung von Ausbringungsgütern (Produkten) aus materiellen und nichtmateriellen Einsatzgütern (Produktionsfaktoren) nach bestimmten technischen Verfahrensweisen.“³⁴

Eine Produktion besteht aus einzelnen Einheiten, welche jeweils einen bestimmten Teil der Produktion erbringen. Die kleinste eigenständig arbeitsfähige Einheit wird als Arbeitssystem bezeichnet. Um ihren Teil der Produktion erstellen zu können (= Output / Mehrwert aus Sicht des Kunden zu erbringen³⁵), benötigt das jeweilige Arbeitssystem Vorprodukte (= Input). Der erbrachte Output kann wiederum einen Input bzw. Produktionsfaktor für die ihm nachfolgenden Arbeitssysteme darstellen. Der Wertschöpfungsprozess (= Produktionsvorgang / Produktionsprozess) kann als Transformationsprozess bezeichnet werden. Bei diesem wird eine Wertsteigerung des Arbeitsobjektes durch den Einsatz von Produktionsfaktoren erreicht.³⁶ Während des Wertschöpfungsprozesses wirken auf die Produktion äußere (exogene) und innere (endogene) Einflüsse ein. Somit kann die Produktion im Allgemeinen - wie auch die Bauproduktion im Speziellen - aufgrund ihrer hohen Wechselwirkung mit der Umwelt und ihrer hohen Komplexität gemäß der folgenden Definition, als (Produktions-) Systeme bezeichnet werden.

Definition System

„Ein System besteht aus einer Menge von Elementen (mit jeweiligen Eigenschaften und Funktionen), die über eine Menge von Beziehungen miteinander verbunden sind. Die Systemgrenze umfasst das System vollständig. Der Einfluss des Systems auf die Umwelt stellt den Output, der Einfluss der Umwelt auf das System, den Input des Systems dar.“³⁷

Um die Leistungsfähigkeit eines Systems zu jeder Zeit gewährleisten zu können, ist eine permanente Kontrolle und Steuerung des Systems erheblich.³⁸ Dieses Erfordernis steigt mit der Komplexität des Systems an. Die Komplexität entsteht durch den wechselseitigen Zusammenhang der einzelnen Systemelemente. Das Verhalten des ganzen Systems hängt vom Zusammenspiel der Einzelelemente ab, da keines der Elemente im System unabhängig ist und auch keines der Elemente isoliert betrachtet werden kann.³⁹

³³ Ferstl & Sinz, 2013, S.88.

³⁴ Günther & Tempelmeier, 2016, S.6.

³⁵ Die Begriffe Wert, Wertstrom und Wertschöpfung werden ausführlich in den Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 erläutert.

³⁶ Vgl. Günther & Tempelmeier, 2016, S.6 f.

³⁷ Trier et al., 2013, S.44 und vgl. Ropohl, 2012, S.21. „Ein System beschreibt eine Ganzheit, welche aus Teilen zusammengesetzt ist.“

³⁸ Vgl. Langemann, 1999, S.8.

³⁹ Vgl. Trier et al., 2013, S.48.

Bezüglich der Zeit sind **statische** und **dynamische** Systeme zu unterscheiden. Bauproduktionen zählen zu den dynamischen Systemen, da sie im Zeitablauf nicht konstant (Struktur und Verhalten des Systems sind flexibel) und daher im Allgemeinen nicht selbstregulierend sind.⁴⁰ Dies bedeutet, dass von einem Leistungsabfall auszugehen ist, sollte auf eine permanente Kontrolle und Steuerung der Leistungsfähigkeit des Systems verzichtet werden.⁴¹

2.1.2 Bauproduktion / Bauprozess

Die Bauproduktion bzw. der Bauprozess (Erläuterung Prozess in Abs. 2.3), unabhängig ob es sich bei dem zu erstellenden Objekt um ein Gebäude, eine Brücke oder einen Tunnel handelt, kann (wie z.B. die Produktion in der stationären Industrie auch) in drei Hauptkomponenten unterteilt werden. Dem Input, dem Output und dem dazwischen stattfindenden Produktionsprozess.⁴² Überträgt man diese aus der stationären Industrie stammenden Begriffe und Definitionen auf das Bauwesen, so kann die Bauproduktion folgendermaßen definiert werden:

Definition Bauproduktion

„Durch den zielorientierten Einsatz geeigneter Bauproduktionsfaktoren, wird unter den gegebenen Bedingungen (exogene und endogene Einflüsse), der vom Endkunden (Bauherr) definierte Wert (= Leistungssoll, Bausoll) möglichst ökonomisch erbracht.“⁴³

Definition Projekt

„Vorhaben, das im Wesentlichen durch Einmaligkeit der Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist.“⁴⁴

Bauprojektarten

Im Bauwesen lassen sich viele verschiedene Projekttypen unterscheiden, da zu diesen neben dem klassischen Bauprojekt auch Investitions- und Organisationsprojekte gezählt werden können. Bauprojekte lassen sich sinnvoll nach den menschlichen Bedürfnissen, den **Grunddaseinsfunktionen**, in unterschiedliche Bauprojektarten aufteilen. Beispielsweise dienen Wohnbauten oder Hotels der Grunddaseinsfunktion „Wohnen“. Die Konzentration dieser Arbeit liegt auf der Grunddaseinsfunktion „**Verkehrsteilnahme**“, welche durch Straßen, Brücke, Schienenverkehrswege oder Tunnel erbracht wird.⁴⁵

⁴⁰ Vgl. Trier et al., 2013, S.48.

⁴¹ Vgl. Langemann, 1999, S.8 f.

⁴² Vgl. Tempelmeier, S.6 f.

⁴³ In Anlehnung an Bregenhorn, 2015, S. 37. Bregenhorn bezieht sich auf verschiedene Quellen nach Girmscheid, z.B. Girmscheid, 2007, Bauproduktionstheorie - Strukturrahmen. In: Bauingenieur Band 82, S.397-413 und Girmscheid, 2008, Bauproduktionstheorie - Bauprozessplanung und -steuerung. In: Bauingenieur Band 83, S.36-48.

⁴⁴ DIN 69901-5, 2009, S.11.

⁴⁵ Vgl. Haghsheno, 2016, S.1.16, vgl. Kochendörfer et al., 2010, S.5, vgl. Johnen, 2017, S.12.

Eigenschaften von Bauprojekten

Motzko beschreibt Bauprojekte als i.d.R. „**zeitlich limitiert** [und aufgrund] der **Einmaligkeit der Bedingungen** gekennzeichnet“⁴⁶, wodurch komplexe Bauprojektorganisationen mit verschiedenen juristischen und natürlichen Personen, die miteinander verbunden sind, entstehen.

Zu den wesentlichen Eigenschaften von Bauprojekten im Unterschied zur stationären Industrie zählt *Gralla* folgende:⁴⁷

Baustellen- und standortgebundene Fertigung

Der Ort der stationären Industrie ist, wie der Name bereits impliziert, stationär, also ortsgebunden. Die Rahmenbedingungen wie z.B. der Ort für die Anlieferung und den Abtransport oder der Fabrikaufbau bleiben über die Zeit bestehen. Jedoch gilt dies nicht für die einzelnen, zu fertigenden Produkte, welche sich durch die Produktionsstätte bewegen.

Das bei einem Bauprojekt entstehende Produkt, das Bauwerk, ist hingegen ortsgebunden, da es nur an dem für ihn bestimmten Standort hergestellt werden kann.⁴⁸ Die exogenen Einflüsse (= Standortbedingungen, wie Lage, Raumangebot, Bodenverhältnisse, Zugänglichkeit, Topologie, Klima, etc.) wechseln von Projekt zu Projekt und die Fertigungsstätten (= Baustelleneinrichtung, Ablaufplanung, Maschinenauswahl, etc.) müssen für jedes Projekt an die neuen Bedingungen angepasst und die Arbeitskräfte, Betriebsmittel und Werkstoffe an die jeweilige Baustelle transportiert werden. Jedes Projekt ist bzgl. seines Ablaufs, Aufbaus und seiner Organisation individuell zu planen.

Einzelfertigung

Bei der stationären Industrie handelt es sich i.d.R.⁴⁹ um die Massenfertigung der immer wieder gleichen (oder zumindest sehr ähnlichen) Produkte.

Wird bei einem Bauprojekt das übergeordnete Produkt (Makroebene) betrachtet, handelt es sich um eine Einzelfertigung. Dies wird bereits durch die oben genannten exogenen Einflüsse, wie den Standort mit seinen einzigartigen Voraussetzungen, bedingt. Werden jedoch auf der Mikroebene die einzelnen Prozesse / Tätigkeiten (z.B. Herstellung einer Wand, Aushub einer Grube), die zur Erstellung des Gesamtprodukts nötig sind, betrachtet, so lässt sich erkennen, dass diese nahezu identisch sind. Eine zyklische Wiederholung (und den hiermit verbundenen Optimierungsprozessen) ähnlich der Fließbandfertigung der stationären Industrie ist aber auch hier, aufgrund der sich ändernden Rand- und Produktionsbedingungen, nicht im selben Maße möglich. Insgesamt betrachtet bietet die Umstrukturierung vom Unikat-Denken hin zum Prozess-Denken dem Bauwesen jedoch die Möglichkeit, die Prozesse genauer zu planen, zu steuern und zu verbessern⁵⁰.

⁴⁶ Motzko, 2013, S.4.

⁴⁷ Vgl. Gralla, 2011, S.7 f.

⁴⁸ Dies gilt für das Gesamtobjekt. Die Herstellung von vorgefertigte Einzelteile, Fertigteile und Halbfertigteile ist nicht immer an die Baustelle gebunden.

⁴⁹ Die Automobilkonzerne (z.B. Porsche, BMW) geben an, dass kaum ein Auto identisch zu einem anderen das Werk verlässt. Bei diesem Punkt nimmt der Autor jedoch Bezug auf signifikante Unterschiede zwischen zwei Produkten, bspw. bzgl. des Fahrzeugtyps.

⁵⁰ Vgl. Kitzmann & Brenk, 2018, S.83.

Fertigung auf Bestellung (Zug / Pull-Prinzip⁵¹)

In der stationären Industrie werden die Produkte i.d.R. entwickelt, gefertigt und dem Markt angeboten. Es handelt sich um eine (spekulative) Vorproduktion, die dem Push (Schub) Prinzip folgt⁵².

Die Bauindustrie hingegen ist eine Bereitschaftsindustrie, in welcher die Bauleistungen von einem Bauunternehmen erst erbracht werden, sobald ein Auftrag (nach einem Ausschreibungs- und Vergabeverfahren) vorliegt. Der Auftraggeber bestimmt, was, wo und wann gebaut werden soll. Die Bauwerksplanung wird durch Architekten, Ingenieure und Fachplaner nach den Wünschen des Auftraggebers erbracht. Die Bauunternehmen haben (je nach Vergabeform und angebotener Leistung) keinen bzw. nur einen geringen Einfluss auf eine fertigungsgerechte Planung des Bauwerks.⁵³

Langfristfertigung

Werden in der stationären Industrie viele gleiche, relative kleine Produkte in kurzer Zeit hergestellt, handelt es sich bei Bauprojekten i.d.R. um einzigartige und - im Vergleich zur stationären Industrie - große Objekte, die über einen langen Zeitraum (Monate oder Jahre) geplant und erstellt werden.

2.1.3 Bauproduktionsfaktoren

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, müssen zur Erbringung des vom Endkunden geforderten Bausolls die Produktionsfaktoren unter Beachtung der gegebenen Einflüsse möglichst effektiv eingesetzt werden. Die (Bau-)Produktionsfaktoren werden je nach Quelle unterschiedlich unterteilt⁵⁴, jedoch spielen das Gesamtverständnis und der Überblick über die Begrifflichkeit eine wichtigere Rolle.

Definition Produktionsfaktoren

„Produktionsfaktoren (PF) sind alle - immateriellen und materiellen - Elemente, sowie menschliche Arbeitsleistung, die im betrieblichen Leistungserstellungs- und Leistungsverwertungsprozess (= Produktionsprozess) benötigt und miteinander kombiniert werden.“⁵⁵

Bauproduktionsfaktoren						
materiell			immateriell			
Arbeitsobjekt	Betriebsmittel	Werkstoffe	Menschliche Arbeit	Informationen & Kommunikation	Kapital	Methoden & Verfahren

Abb. 4: Bauproduktionsfaktoren⁵⁶

⁵¹ Ausführliche Erläuterungen zum Zug / Pull-Prinzip und zum Schub / Push-Prinzip folgen im Kapitel 5.3.5.

⁵² Das ist eine sehr generelle Aussage. Natürlich gibt es auch in der stationären Industrie auftragsbezogene Fertigungen, die sich an der tatsächlichen Marktnachfrage und den individuellen Kundenwünschen (Customization) orientieren.

⁵³ Vgl. Bauer, 2007, S.751 f.

⁵⁴ Bauer, 2007, S.523 f., Girmscheid, 2010, S.620 und S.1060, Gutenberg, 1976, S.70 ff., DIN 6385, 2016, S.7 ff., Leimböck und Iding, 2005, S.273, Günther & Tempelmeier, 2016, S.6, Zilch et al., 2013, S.415 ff.

⁵⁵ In Anlehnung an Zilch et al., 2013, S.415.

⁵⁶ Darstellung orientiert sich an Günther & Tempelmeier, 2016, S.6 und Zilch et al., 2013, S.415 ff.

Zu den **materiellen** Bauproduktionsfaktoren zählen das Arbeitsobjekt (Standort), die Betriebsmittel und die Werkstoffe.

Speziell für den Tunnelbau spielt das **Arbeitsobjekt** bzw. der **Standort** eine bedeutsame Rolle. Hierunter werden sowohl das Grundstück bzw. der Boden im Sinne des Standortes der Bebauung (z.B. Gebäude), wie auch der Boden bzw. das Gebirge als Gegenstand des Abbaus im Tunnelbau verstanden. Durch seinen Einfluss (als tragendes Element, als Belastung auf, und als Baustoff für das Bauwerk, siehe Kapitel 6.1) geht der Boden bei einem Bauprojekt i.d.R. indirekt in das Endprodukt ein, beim Tunnelbau direkt.⁵⁷

Als **Betriebsmittel** werden das Inventar und das technische Inventar bezeichnet, die nicht Bestandteil des erzeugten Bauwerks sind. Hierzu zählen Maschinen, Geräte, Werkzeuge und verschiedene Anlagen und Einrichtungen. Diese können das Betriebsgrundstück (Arbeitsraum) mit seinen Logistik- und Lagerflächen (inkl. Deponiefläche für den Abraum beim Tunnelvortrieb), die Betriebsgebäude als (vorrübergehender) Standort des Unternehmens mit den Büroeinrichtungen und der Infrastruktur, die Informations- und Kommunikationsanlagen sowie die Transport-, Förder- und Verkehrsmittel sein.⁵⁸

Die **Werkstoffe** gehen entweder direkt in das Bauwerk (bzw. Fabrikat) ein, wie die Roh- bzw. Baustoffe als Hauptbestandteil (z.B. Spritzbeton) und die Bauhilfsstoffe als untergeordneter Bestandteil (z.B. Betonverflüssiger), oder sie werden bei der Produktion des Fabrikats verbraucht, wie die Betriebsstoffe (z.B. Treibstoff). Auch Halb- und Zwischenfabrikate können zu den Werkstoffen gezählt werden, wie beispielsweise vorgefertigte Rohre.⁵⁹

Zu den **immateriellen** Bauproduktionsfaktoren können die menschliche Arbeit (Elementarfaktor und Dispositiver Faktor), Informationen und die Kommunikation, das Kapital sowie Methoden und Verfahren gezählt werden.

Die **menschliche Arbeit** ist bei der Produktion für die Leistungserbringung zur Werterzeugung von essentieller Bedeutung und als der wesentliche Bauproduktionsfaktor zu sehen, der sich in zwei Teile aufschlüsseln lässt. Zum einen in die **körperliche Arbeit** (= Elementarfaktor⁶⁰), die im industriellen Bereich und zunehmend auch im Baubereich aufgrund der maschinellen Anlagen, der Vorfertigung und der Automation, in den Hintergrund tritt. Zum anderen in die **geistige Arbeit**, welche auch als dispositiver Faktor⁶¹ bezeichnet wird. Zu diesen zählen die Aufgaben von Führungskräften, Planern und im weiteren Sinne auch von leitenden Angestellten und der Projektleitung sowie seiner Vertretung. Diese Aufgaben umfassen die Planung, Organisation, Überwachung, Steuerung und Koordination der

⁵⁷ Vgl. Zilch et al., 2013, S.418 f., vgl. Günther & Tempelmeier, 2016, S.6 ff.

⁵⁸ Vgl. Zilch et al., 2013, S.417, vgl. Günther & Tempelmeier, 2016, S.6 ff.

⁵⁹ Vgl. Zilch et al., 2013, S.418 f., vgl. Günther & Tempelmeier, 2016, S.6 ff.

⁶⁰ Vgl. Bauer, 2007, S.523.

⁶¹ Nach Gutenberg (Gutenberg, 1976, S.131 ff.) Bezeichnung für denjenigen Produktionsfaktor, der die **Elementarfaktoren** menschliche Arbeitskraft, Betriebsmittel und Werkstoffe kombiniert. Die Kombination der Elementarfaktoren erfolgt durch die Geschäftsführung, wobei diese sich der Planung und Organisation als Hilfsmittel bedient. Geschäftsleitung, Planung und Organisation bilden den dispositiven Faktor. Da jedoch auch die Koordination und die Steuerung in der unterschiedlichen Literatur zur Organisation gezählt werden, können sie nach Meinung des Autors zum dispositiven Faktor hinzugefügt werden.

(Bau-) Produktionsfaktoren, um das vom Kunden definierte Leistungssoll so ökonomisch wie möglich zu erbringen. Zu den geistigen Arbeiten innerhalb eines Bauunternehmens zählen ergänzend die folgenden:

- Technische Leitung (Marketing, Akquisition, Kalkulation, Arbeitsvorbereitung, Bauausführung, Abrechnung)
- Kaufmännische Leitung (Beschaffung/Einkauf, Rechnungswesen, Lohn- und Betriebsbuchhaltung, Finanz- und Anlagenbuchhaltung, Bankenverkehr)
- Administrative Leitung (Organisation, Personalbetreuung, EDV-Information und Kommunikation, Recht, Steuern, Versicherungen).⁶²

Informationen und **Kommunikation** könnten im weitesten Sinne noch zur menschlichen Arbeit gezählt werden. Da sie jedoch zunehmend an Bedeutung für den Wertschöpfungsprozess gewinnen, werden sie als eigenständiger Produktionsfaktor herausgestellt. Im Bauwesen ist einer der größten (nicht werterzeugenden bzw. bewussten, siehe Kapitel 5.2.2) Kostenfaktoren die „Produktion“ (= Entstehung) von Fehlern bzw. Mängeln. Eine häufige Ursache für Fehler in der Produktion ist das Fehlen von Informationen und mangelhafte Kommunikation. Fehlende oder widersprüchliche Informationen führen zu Unsicherheiten, Verwirrung und Mängeln. Nicht nur im Bereich der Unternehmensführung, sondern auch bzgl. der Kunden, Mitarbeiter, Lieferanten, Nachunternehmer und Behörden gewinnen die Informations- und Kommunikationssysteme an Bedeutung. Der Informationsaustausch findet hierbei im Kleinen (direkte Gespräche z.B. auf der Baustelle zwischen den Ausführenden) und im Großen (z.B. Transfer von Planungsdaten zwischen dem Architekturbüro in der einen Stadt und dem Tragwerksplanungsbüro in einer anderen Stadt oder in einem anderen Land über webbasierte Projektplattform) statt.⁶³

Die weitere Entwicklung von Plattformen für den Informationsaustausch, Tools (z.B. Smartphone oder Tablet-Apps) als unterstützendes Hilfsmittel für die geistige menschliche Arbeit, aktuelle Soll- und Ist-Daten und ganzheitliche Infrastrukturlösungen (BIM) werden zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen. Ein Tool zur Analyse von Ist-Situationen und zur Bereitstellung von Lösungsmöglichkeiten auftretender Probleme stellt das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell dar.

Das **Kapital** nimmt als Produktionsfaktor im Baugewerbe laut *Zilch et al.* eine zentrale Rolle ein, weshalb es aus verschiedenen Sichtweisen betrachtet werden muss. Das Kapital als Passivseite der Bilanz zur Darstellung der Vermögensquellen, als Gegenstand der Unternehmensfinanzierung und Liquiditätssicherung, als Gegenstand strategischer Maßnahmen im Finanz- und Rechnungswesen oder als Gegenstand der Projektfinanzierung im Rahmen der Projektentwicklung.⁶⁴ Bezogen auf die Unternehmen der Bauwirtschaft ist das Thema Kapital geprägt durch einen überregionalen Wettbewerb, wobei sich die Unternehmen bzgl. ihrer Strukturen kaum von der Konkurrenz unterscheiden. Für den Kunden sind keine signifikanten Unterschiede des Leistungsangebots der einzelnen Unternehmen zu erkennen, welche somit leicht zu ersetzen sind. Die Auswahl erfolgt lediglich über den

⁶² Vgl. Zilch et al., 2013, S.416.

⁶³ Vgl. ebenda, S.420.

⁶⁴ Vgl. ebenda, S.419 f., Auf eine ausführliche Untersuchung dieser Einteilung wird an dieser Stelle verzichtet, da dies nach Meinung des Autors keinen Mehrwert für die Arbeit bedeutet. Es sei jedoch auf Zilch et al., 2013, S.431 ff., S.541 ff., S.577 ff. und S.623 ff. verwiesen.

Angebotspreis.⁶⁵ „Den zukünftigen Wettbewerb werden hauptsächlich die Bauunternehmen gewinnen, die effiziente und effektive Prozesse in der Projektabwicklung erreichen.“⁶⁶ Das Prozessmodell dieser Arbeit bietet hierfür ein Hilfsmittel.

Auch die **Methoden** und **Verfahren** könnten im weitesten Sinne zur menschlichen Arbeit gezählt werden. Aufgrund ihrer Bedeutung für die Bauproduktion werden sie ebenfalls als eigenständiger Bauproduktionsfaktor herausgestellt. Hierzu zählen zum einen das Wissen bzgl. Bauabläufe, Umstände und Auswirkungen der Produktionsverfahren, zum anderen spezielle Systeme und Wissen, welche ein Unternehmen im Sinne von Lizenzen oder Patenten entwickelt oder weiterentwickelt hat.⁶⁷ Die ständige Weiterentwicklung und kritische Überprüfung dieser Methoden und Verfahren stellt eine wichtige Aufgabe eines jeden Unternehmens dar, um leitungs- und konkurrenzfähig zu bleiben.⁶⁸ Die Methode der Prozessorientierung und der Anpassung der Bauabläufe als Reaktion auf unplanmäßige Störungen ist die Grundlage des entwickelten Prozessmodells.

2.1.4 Potential und Kapazität des Baubetriebes

Das Potential eines Baubetriebes ergibt sich aus den **Bauproduktionsfaktoren (PF)**, die für die Bauproduktion (= Summe aller notwendigen Prozesse) eingesetzt werden. Die einzelnen PF bzw. sinnvolle **Kombinationen dieser PF (PFK)** haben ein bestimmtes **Arbeits- bzw. Produktionsvermögen**, das **Potential P**.⁶⁹ Hahn definiert das Potential als die „...noch entwickelbare[n ...] Eigenschaftsmerkmale [...] und damit auch die Leistungsfähigkeit [...]“⁷⁰

Mit der **Kapazität K**⁷¹ (auch Auslastungsgrad⁷²) wird das **Leistungsvermögen** qualitativ und quantitativ beschrieben.⁷³ Hierfür wird das Potential P des jeweiligen PF (bzw. PFK) mit dessen möglicher **Einsatzzeit z** multipliziert und es ergibt sich die **theoretische Kapazität K_t** dieses PF (bzw. PFK). Die Summe der Kapazitäten aller möglichen PF und PFK ergibt die theoretische Kapazität K_t des Betriebes.⁶⁹

Die theoretische Kapazität K_t und die nutzbare Kapazität K_n eines PF (bzw. PFK) ergeben sich somit aus:⁶⁹

$$K_t = P * z$$

Formel 1: Theoretische Kapazität K_t

K _t	=	theoretische Kapazität
P	=	Potential
z	=	Zeit (Einsatzzeit)

⁶⁵ Vgl. Girmscheid, 2008, S.651.

⁶⁶ Kaiser, 2013, S.7.

⁶⁷ Vgl. Bregenhorn, 2015, S.39.

⁶⁸ Vgl. Girmscheid, 2008, S.651 f.

⁶⁹ Vgl. Bauer, 2007, S.524 f.

⁷⁰ Hahn, 1996, S.15.

⁷¹ Lat.: *capacitas* = „Fassungsvermögen“.

⁷² Vgl. Leimböck et al., 2017, S.136.

⁷³ Vgl. Thommen et al., 2017, S.255.

Um die **nutzbare**⁷⁴ **Kapazität K_n** zu ermitteln, muss der **Potentialnutzungsfaktor e** (auch: Effizienz, Betriebsgüte, erreichbare Nutzung) des PF (bzw. PFK) berücksichtigt werden.⁷⁵

$$K_n = P * z * e$$

Formel 2: Nutzbare Kapazität K_n ⁷⁶

K_n = nutzbare Kapazität
 e = Potentialnutzungsfaktor

Verbindung Potential und Kapazität

Je schneller (= Erhöhung des Potentials) und je öfter (= Erhöhung der Einsatzzeit, Anzahl an Zeiteinheiten ze) eine bestimmte Arbeit (= Prozess) mittels der für diese Arbeit notwendigen Produktionsfaktoren erbracht werden kann, desto höher ist die Kapazität K des ausführenden Betriebes. Wie in der folgenden Abb. dargestellt ergibt sich die Kapazität aus der Multiplikation mit der Einsatzzeit (= Summe der Zeiteinheiten ze). Die Größen der Kapazitäten K_t (dunkelgrau) und K_n (hellgrau) kann durch die Flächengrößen dargestellt werden.

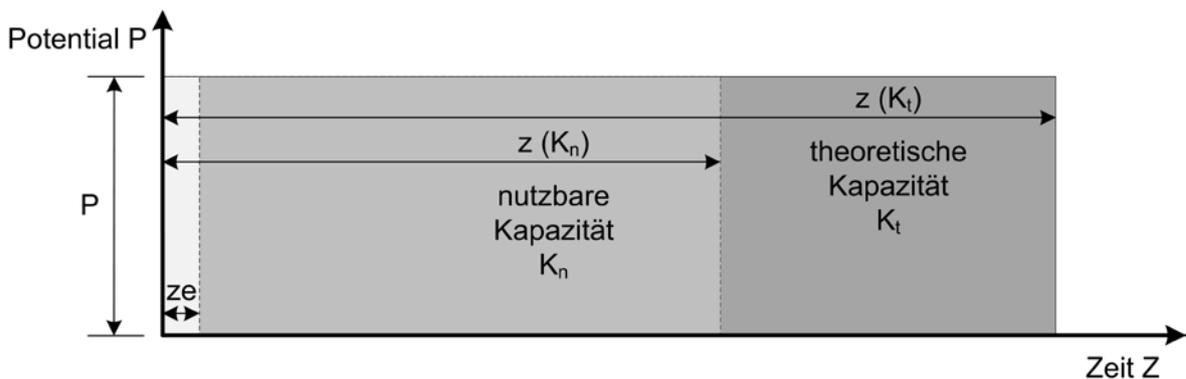


Abb. 5: Potential und Kapazität⁷⁷

Wird der gesamte Bauprozesses als Summer der einzelnen Bauabschnitte betrachtet und dieser auf die Ressource Personal bezogen, ist unter der Kapazitätsplanung die Auswahl und Einteilung des Personals in Kolonnen und die Zuordnung dieser Kolonnen zu den Bauabschnitten zu verstehen.⁷⁸

2.1.5 Prozessoptimierung durch Produktivitätssteigerung

Das Hauptziel jedes Produktionsbetriebes ist es, nach dem Wirtschaftlichkeitsprinzip zu handeln, also Geld zu verdienen. Mit der Engpasstheorie (siehe Kapitel 5.4) beschreibt **Goldratt**, dass dieses Ziel mithilfe der drei Variablen bzw. Kennzahlen **Durchsatz**, **Bestände** und **Betriebskosten** erreicht werden kann.⁷⁹ Der Durchsatz soll hierbei möglichst hoch sein, die Bestände sowie die Betriebskosten möglichst gering gehalten werden. Als

⁷⁴ Auch praktische Kapazität.

⁷⁵ Vgl. Bauer, 2007, S.525.

⁷⁶ Bauer, 2007, S.525.

⁷⁷ In Anlehnung an Bauer, 2007, S.525.; ze = Zeiteinheit; $z = \sum ze$.

⁷⁸ Vgl. Böttcher, 2015, S.7.12.

⁷⁹ Vgl. Goldratt, 2004, S.71 f.

das wirtschaftliche Problem von sowohl der stationären Industrie wie auch vom Baugewerbe wurde die Produktivität ausgemacht.

Die Produktivitätssteigerung durch die Verringerung von Verschwendungen (siehe Kapitel 5.2.2) ist der Ausgangspunkt eines übergeordneten Formalziels (auch Erfolgsziel), welches am Erfolg der betrieblichen Tätigkeiten gemessen wird. Um diesen Erfolg zu erreichen, muss der Einsatz der Produktionsfaktoren optimiert werden. Dies geschieht durch den Fokus auf das ökonomische Prinzip, welches sich in drei Variationen anwenden lässt:⁸⁰

- **Maximalprinzip:** Mit vorgegebenen Ressourcen (Input) ist ein maximaler Output zu erreichen.
- **Minimalprinzip:** Ein vorgegebener Output ist mit minimalen Ressourcen (Input) zu erreichen.
- **Optimalprinzip:** Weder Ressourcen (Input) noch Output sind vorgegeben. Beide sind so aufeinander abzustimmen, dass ein vorgegebenes ökonomisches Ziel optimal erreicht wird.

In welchem Maße das ökonomische Ziel erreicht wird, wird mit der Effizienz gemessen.

Definition Effizienz

„Unter Effizienz versteht man die Beurteilung der Beziehung zwischen der erbrachten Leistung und dem Ressourceneinsatz.“⁸¹

Die Effizienz beschreibt somit die interne Leistungsfähigkeit des Unternehmens bzgl. der Abläufe, der Werterzeugung und des Ressourceneinsatzes und kann mit der Produktivität gemessen werden.

Definition Produktivität

„Als Produktivität bezeichnet man das mengenmäßige Verhältnis zwischen Output und Input des Produktionsprozesses.“⁸¹

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Arbeitsergebnis}}{\text{Einsatzmenge an Produktionsfaktoren}}$$

Formel 3: Produktivität⁸²

Verbindung Effizienz / Produktivität und Potential / Kapazität

Die Produktion arbeitet effizient (Produktivität ist hoch), wenn der Input (Einsatz Produktionsfaktoren) für den geforderten Output (Leistungssoll) so gering wie möglich ist (= Maximalprinzip). Das wird erreicht, indem die Kapazität der maßgebenden⁸³ (zeitkritischen) Prozesse maximiert (optimiert) und der nicht-maßgebenden minimiert wird (= Optimalprinzip).

⁸⁰ Vgl. Thommen et al., 2017, S.46.

⁸¹ Thommen et al., 2017, S.46.

⁸² Thommen et al., 2017, S.46.

⁸³ Welche die „maßgebenden“ Prozesse sind wird in Kapitel 3.1 erläutert.

Wert-Box 01: Einordnung in die Themenstellung und Wert für das Prozessmodell

Unter dem Begriff der Bauproduktion ist der zielorientierte Einsatz geeigneter Bauproduktionsfaktoren zu verstehen, mit welchem unter den gegebenen Bedingungen der vom Kunden bestellte Wert möglichst ökonomisch erbracht werden soll. Wegen ihrer hohen Wechselwirkung mit der Umwelt und ihrer hohen Komplexität wird die Bauproduktion als **dynamisches, nicht selbstregulierendes System** bezeichnet, dessen Leistungsfähigkeit nur erhalten bleibt, wenn es einer **permanenten Kontrolle** und **Steuerung** unterliegt. Hierbei ist stets das **Zusammenspiel der Einzelemente** des Systems zu betrachten, da keines der Elemente im System unabhängig ist. Die Bauproduktionsfaktoren sind hierbei alle immateriellen und materiellen Elemente, sowie die menschliche Arbeitsleistung, die im Produktionsprozess benötigt und miteinander kombiniert werden.

Von besonderer Bedeutung für die Steuerung sind die **immateriellen Bauproduktionsfaktoren** menschliche Arbeit (**Dispositiver Faktor**), Informationen, Kommunikation, Methoden und Verfahren. Die Entwicklung von (u.a.) Tools als unterstützende Hilfsmittel für den **Informationsaustausch** und zur **Kontrolle** wird an Bedeutung gewinnen. Ein Tool zur Analyse der Ist-Situation und zur Bereitstellung von Lösungsmöglichkeiten bei auftretenden Problemen (außerplanmäßige Situation) stellt das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell dar.

Ebenso von Bedeutung ist die ständige Weiterentwicklung und kritische Überprüfung der eingesetzten **Methoden** und **Verfahren**. Die **Prozessorientierung** und die kontinuierliche Anpassung der Bauabläufe ist die Grundlage des entwickelten Prozessmodells. Mit diesem soll die **Kapazität** der maßgebenden Prozesse erhöht werden, indem die Bauproduktionsfaktoren optimal eingesetzt werden.

Diese haben einzeln betrachtet bzw. sinnvoll kombiniert ein bestimmtes Arbeits- bzw. Produktionsvermögen, das **Potential**. Unter der **Kapazität** eines Prozesses ist das qualitative und quantitative **Leistungsvermögen** zu verstehen. Dieses kann erhöht werden, indem der Prozess schneller (= Erhöhung des Potentials) und öfter (= Erhöhung der Einsatzzeit) erbracht wird, wobei auf die **Effizienz** im gesamtheitlichen Kontext zu achten ist. Unter der Effizienz ist die Beurteilung der Beziehung zwischen der erbrachten Leistung und dem Ressourceneinsatz zu verstehen. Auf den Gesamtprozess bezogen beschreibt die Effizienz die interne Leistungsfähigkeit des Unternehmens bzgl. der Abläufe, der Werterzeugung und des Ressourceneinsatzes. Die Effizienz lässt sich mit der **Produktivität** messen. Diese beschreibt das mengenmäßige Verhältnis zwischen Output und Input des Produktionsprozesses.

Zusammenfassung: Verbindung Effizienz/Produktivität und Potential/Kapazität

Die Produktion arbeitet effizient (Produktivität ist hoch), wenn der Input (Einsatz Produktionsfaktoren) für den geforderten Output (Leistungssoll) so gering wie möglich ist. Das wird erreicht, indem die Kapazität der maßgebenden (zeitkritischen) Prozesse maximiert (optimiert) und der nicht-maßgebenden minimiert wird.

2.2 Bauablauf

Aus Sicht des Bauunternehmens (Auftragnehmer, AN) ist unter der Planung des Bauablaufs die Planung der eigentlichen Bauproduktion zu verstehen, so wie es in Abs. 2.1.2 beschrieben wurde. Aus Sicht des Auftraggebers (AG) hingegen umfasst die Ablaufplanung die zeitliche Koordination aller Vorbereitungs- und Planungshandlungen (z.B. Baugenehmigung, Grundstückserwerb).⁸⁴

Allgemein werden mit dem Begriff der Ablaufplanung alle Aktivitäten und insbesondere ihre Reihenfolge beschrieben, welche zur Planung und Steuerung von Bau- und Planungsabläufen notwendig sind, um ein bestimmtes Ziel (wirtschaftliche Projektrealisierung) zu erreichen. Die Ablaufplanung des AN soll einen wirtschaftlich optimalen Einsatz der Bauproduktionsfaktoren (z.B. menschliche Arbeit, Betriebsmittel, Werkstoffe, Informationen) gewährleisten und wird in dieser Arbeit betrachtet.⁸⁵ Werden der in der Ablaufplanung bestimmten Reihenfolge der Aktivitäten, zeitliche bzw. terminliche Informationen hinzugefügt, handelt es sich um eine Terminplanung.

2.2.1 Ablaufplanung

Die Ablaufplanung besteht hauptsächlich aus den Teilbereichen der Produktionsplanung der stationären Industrie. Dies sind die Planung des Produktionsprogramms, die Planung der Bereitstellung der Produktionsfaktoren, welche zur Herstellung der Erzeugnisse benötigt werden und die Planung des Produktionsprozesses.⁸⁶

Wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, ist die Vorgabe des Produktionsprogramms (Bausoll) durch den Auftraggeber eine Besonderheit der Bauindustrie. Die Produktionsplanung (und Bauproduktion), also das Herstellungsverfahren, die Planung und Koordination des Planungs- und Bauausführungsablaufs und der Produktionsfaktoren, liegt jedoch im Bereich des Auftragnehmers⁸⁷, welcher durch die Optimierung dieser den Auftrag unter Berücksichtigung aller Randbedingungen so kostenoptimal wie möglich auszuführen hat.⁸⁸

2.2.2 Detaillierungsgrad von der Ablauf- zur Terminplanung

Der Detaillierungsgrad der Planung hängt vom Zweck ab und steigt von frühen Projektphasen ausgehend im Laufe des Projektes von einer groben zu einer immer genaueren Planung an. Sobald der in der Ablaufplanung bestimmten Reihenfolge der Aktivitäten, zeitliche bzw. terminliche Informationen (infolge einer Leistungermittlung) hinzugefügt werden, ist von einer Terminplanung zu sprechen, die fortwährend genauer wird. Einem Rahmenterminplan folgen eine Grob-, Steuerungs- und eine Detailterminplanung. Diese Einteilung ist zum einen bedingt durch die Notwendigkeit in den Projektphasen und zum anderen nimmt der Informationsgehalt kontinuierlich zu und erlaubt somit eine Erhöhung der Detailtiefe.⁸⁹

⁸⁴ Vgl. Bauer, 2007, S.529.

⁸⁵ Vgl. Gralla, 2011, S.193, vgl. Böttcher, 2015, S.7.3 f.

⁸⁶ Vgl. Bauer, 2007, S.527, vgl. Böttcher, 2015, S.7.3.

⁸⁷ Vgl. Gralla, 2011, S.193 f.

⁸⁸ Vgl. Bauer, 2007, S.527, 531 ff., vgl. Haghsheno, 2016, S.1.24 ff.

⁸⁹ Vgl. Gralla, 2011, S.194, vgl. Haghsheno, 2016, S.1.24 f.

Rahmenterminplan

Wird i.d.R. vom Arbeitgeber möglichst früh erstellt und dient dem Arbeitnehmer zum Überblicken der wesentlichen Rahmen- und Ecktermine, wie terminkritischer Vorgänge und wesentlicher Meilensteine (z.B. Baubeginn, Abnahme).⁹⁰

Generalterminplan (Generalablaufplan)

Wird entwickelt, um die projektorientierten Vorgänge miteinander zu verknüpfen und diese den Projektbeteiligten und Ausführungselementen zuzuordnen und den „Kritischen Weg“ aufzuzeigen.⁹⁰

Grobterminplan

Die Grobtermine werden innerhalb der gesamten Bauzeit (Vertrags- und Zwischentermine) festgelegt. Somit dient der Grobterminplan als langfristiges Steuerungsinstrument.⁹⁰

Koordinationsterminplan / Steuerungsterminplan

Der Koordinations- bzw. Steuerungsterminplan wird auch einfach als Termin- oder Ablaufplanung bezeichnet.⁹¹ Hierbei werden alle vertraglich vereinbarten Bauzeiten bzgl. der Bauausführungsleistungen berücksichtigt.

Feinterminplan / Detailterminplan

Der Ablauf der einzelnen Vorgänge bzw. Fertigungsschritte und die Verknüpfung der Gewerke werden im Fein- bzw. Detailterminplan dargestellt. Hierbei wird auf Basis der einzelnen Arbeitsvorgänge der Gewerke die chronologische und technologische Reihenfolge, Fertigungsmengen, sowie Leistungs- und Aufwandswerte möglichst genau festgelegt. Da die jeweiligen Rahmenbedingungen bzw. vorhandenen Baustellenverhältnisse zu berücksichtigen sind, erfolgt die Feinterminplanung innerhalb der Bauausführungsphase.⁹⁰

2.2.3 Darstellungsformen der Terminplanung

Die erarbeitete Terminplanung sowie die Zusammenhänge der Vorgänge sind zu visualisieren, damit diese kommuniziert und gesteuert werden können. Dies ist je nach Zweck in Form von Balkenplänen, Terminlisten, Liniendiagrammen oder Netzplänen möglich.

Terminliste

Terminlisten sind die einfachste Form zur Darstellung der Ablaufplanung, indem sie alle Vorgänge tabellarisch in der Reihenfolge ihres Auftretens auflisten und diese ggf. um weitere Informationen (z.B. Vorgangs-Nr., Benennung, Dauer, Start- und Endtermin, Nachfolger⁹²) ergänzen.⁹³ Diese Form der Vorgangs- (bzw. Prozess-)Darstellung eignet sich optimal für das Abgleichen und Berechnen der Prozesse bzw. ihrer zugeordneten Kennzahlen und wird somit im Prozessmodell Anwendung finden.

⁹⁰ Vgl. Gralla, 2011, S.197 ff., vgl. Haghsheno, 2016, S.1.24.

⁹¹ Vgl. Berner et al., 2008, S.58.

⁹² Vgl. DIN 69900, 2009, S.16 ff., vgl. Haghsheno, 2016, S.1.25 f.

⁹³ Vgl. Gralla, 2011, S.203 ff.

Liniendiagramm (Linienplan)

In Liniendiagrammen werden die Vorgänge anhand von Geraden mit unterschiedlichen Steigungen (= Fortschrittsgeschwindigkeit) in einem rechtwinkligen Koordinatensystem dargestellt. Die (Bau-/Prozess-)Zeit wird auf der Ordinate abgebildet, auf der Abszisse der Arbeitsfortschritt (Leistung oder Arbeitsvolumen = Volumen-Zeit-Diagramm (V/Z), Weg, Strecke oder Tunnelmeter = Weg-Zeit-Diagramm (W/Z)). Durch diese Anordnung ergibt sich, dass eine geringe Steigung eine langsame Vorgangsgeschwindigkeit, eine starke eine schnellere Vorgangsgeschwindigkeit anzeigt.⁹³ Diese Form der Darstellung eignet sich zur Visualisierung der Prozesseigenschaften und -anordnung, insbesondere von Linienbauprojekten wie dem Tunnelbau. Beispiele für diese Darstellungsform werden im Abs. 2.2.5 gegeben.

Balkenplan

Die Darstellung der Vorgänge mittels eines Balkenplans (auch Balkendiagramm, Gantt-Chart) ist eine Kombination aus einer grafischen und einer Listendarstellung. Hierbei werden die Vorgänge untereinander (vertikal) aufgelistet und ihre Dauer anhand von rechteckigen horizontalen Balken zeitmaßstäblich (Stunden, Tage, Wochen, Monate) über eine Zeitachse dargestellt. Die Länge des Balkens entspricht somit seiner Dauer. Besondere Ereignisse (Vertragstermine wie z.B. der Baubeginn oder eine Abnahme) werden mit Meilensteinen dargestellt. Zusätzliche lassen sich im Listenbereich weitere Vorgangsinformationen (z.B. Vorgangsbeginn, -ende, Ressourcen, etc.) hinzufügen. Die Abhängigkeiten der Vorgänge untereinander lassen sich im grafischen Bereich anhand von Pfeilen (Beziehungen) darstellen.⁹³ Diese Form der Darstellung eignet sich zur Visualisierung von Vorgangs- (bzw. Prozess-)Abfolgen (z.B. Normalfolge, Anfang-Anfang-Folge, Ende-Ende-Folge), Parallelitäten, Überlappungen und für Soll-Ist-Vergleiche.

Netzplan

Mit der Netzplantechnik lassen sich komplexe vielschichtige Ablaufstrukturen (komplexe Prozesse, Abhängigkeiten) grafisch abbilden, indem in einem Graphennetz Knoten (Punkte) (= Prozesse mit bestimmten Informationen) durch Kanten (Linien) (= Anordnungsbeziehungen) verbunden werden.⁹³ Drei wesentliche Netzplanmethoden sind zu unterscheiden. Die Vorgangsknoten- (VKN, auch Metra Potential Method, MPM), die Vorgangspfeil- (VPN, auch Critical Path Method, CPM) und die Ereignisknoten-Netzpläne (EKN)⁹⁴, wobei heute i.d.R. nur noch die VKN Anwendung finden.⁹²

Vorgangsknoten-Netzplan

Die einzelnen Vorgänge werden durch Knoten dargestellt, in welchen alle bzgl. der jeweiligen Bedürfnisse notwendigen Informationen (z.B. Vorgangs-Nr., Benennung / Beschreibung, Dauer, Start- und Endtermin, Anordnungsbeziehung) gegeben sind. Anhand der Ablaufinformationen lassen sich die Knoten in eine zeitliche Beziehung setzen.⁹⁵

⁹⁴ Für weitere Erläuterungen zu VPN und EKN sei auf bspw. Gralla, 2011, S.210 f. oder Haghsheho, 2016, S.1.28 f. verwiesen.

⁹⁵ Vgl. Gralla, 2011, S.209 f.

Informationen Knoten

Vorgangs-Nr.		
Vorgangsbenennung / - beschreibung		
FA	D	FE
SA	GP	SE

- FA = frühester Anfang
- SA = spätester Anfang
- FE = frühestes Ende
- SE = spätestes Ende
- D = Vorgangsdauer
- GP = gesamte Pufferzeit

Abb. 6: Schema Netzplan-Knoten mit Informationen⁹⁶

Anordnungsbeziehungen

Mit Hilfe der Anordnungsbeziehungen werden die Verknüpfungen bzw. Abhängigkeiten der Vorgänge beschrieben. Diese können technische, verfahrenstechnische oder technologische Gründe haben. Liegen Prozesse auf dem Kritischen Weg (Bearbeitungszeit der verbundenen und voneinander abhängigen Vorgänge kann nicht verlängert werden, ohne die Gesamtzeit zu verlängern, da keine Pufferzeiten vorhanden sind), sind sie meist in einer Normalfolge oder in einer Anfangsfolge zu leisten.

Prozesse, die nicht auf dem Kritischen Weg liegen und einen Puffer haben, sind in einem bestimmten Zeitrahmen zu erbringen. Sie haben einen frühesten Anfang oder ein frühestes Ende, können jedoch auch zu einem spätesten Anfang begonnen oder zu einem spätesten Ende abgeschlossen werden.

Anordnungsbeziehung	Darstellung
Normalfolge (NF) / Ende-Anfang (EA) Vom Ende eines Vorgangs zum Anfang seines Nachfolgers. Zeitabstand dazwischen definierbar.	
Anfangsfolge (AF) / Anfang-Anfang (AA) Vom Anfang eines Vorgangs zum Anfang seines Nachfolgers. Zeitabstand dazwischen definierbar.	
Endfolge (EF) / Ende-Ende (EE) Vom Ende eines Vorgangs zum Ende seines Nachfolgers. Zeitabstand dazwischen definierbar.	
Sprungfolge (SF) / Anfang-Ende (AE) Vom Anfang eines Vorgangs zum Ende seines Nachfolgers. Zeitabstand dazwischen definierbar.	

Abb. 7: Darstellung und Erläuterung der möglichen Anordnungsbeziehungen⁹⁷

⁹⁶ In Anlehnung an DIN 69900, 2009, S.26

⁹⁷ In Anlehnung an ebenda, S.28

2.2.4 Unsicherheiten im Bauablauf

Anhand der in Abs. 2.1.2 gegebene Definition der Bauproduktion „[...] **unter den gegebenen Bedingungen (exogene und endogene Einflüsse)**, [wird] der [...] definierte Wert [...] erbracht“⁴³ und der Beschreibung der Eigenschaften eines Bauprojektes „**zeitlich limitiert und aufgrund der Einmaligkeit der Bedingungen gekennzeichnet**, [...]“⁴⁶, wird deutlich, dass die aus früheren Projekten ermittelten Aufwands- und Leistungswerte sowie die Terminplanung mit Unsicherheiten behaftet sein müssen. Dies gilt sowohl für den Hochbau wie auch im besonderen Maße für den Tunnelbau, da für diesen weder eine einheitliche, noch eine genaue Erkundung des gesamten, durchfahrenen Bodens möglich ist (siehe Kapitel 6).⁹⁸

Es wird bei der Ablaufplanung vorausgesetzt, dass die Vorgangsdauern deterministisch sind. Insbesondere für das Bauwesen sind solche Annahmen jedoch fragwürdig.⁹⁹ Aufgrund der verschiedenen exogenen Einflüsse (zufällige Störgrößen) kann kaum ein Bauprozess unter den gleichen, wiederkehrenden Bedingungen ablaufen. Im Tunnelbau hat alleine die Geologie einen erheblichen Einfluss auf die Dauer der einzelnen Vorgänge. Deshalb sind diese Prozesse als **stochastische Prozesse** zu bezeichnen.⁹⁹ Weiterhin ist zu beachten, dass stochastische Prozesse (bzw. stochastische Modelle) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen nutzen und somit auf statistische Daten angewiesen sind. Damit die Erfahrungsdaten bzgl. der Bauprozesse aus vorangegangenen Projekten für eine statistische Aussage sinnvoll genutzt werden können, müssen sie folgende Bedingungen erfüllen:¹⁰⁰

1. Die Daten müssen vergleichbar sein (= unter gleichen Bedingungen ermittelt).
2. Die Anzahl der Daten muss ausreichend groß sein¹⁰¹.

Diese Forderungen sind bzgl. der Bauprozesse aufgrund der bereits genannten Eigenschaften problematisch bzw. oft unmöglich. Nach *Bauer* ist kein Bauprozess detailliert wiederholbar und die Anzahl von vergleichbaren Daten ist viel zu gering.¹⁰⁰ Die Anzahl der Daten kann auch nicht als Qualitätskriterium angesehen werden, da anhand der Daten ein Schätzwert ermittelt wird, dessen Aussagekraft wegen seiner großen Varianz gering sein kann. Durch einen ausreichend großen Stichprobenumfang kann eine hinreichende Präzision des Schätzwertes und eine Verringerung der Varianz erreicht werden. Diese Präzision hängt jedoch wiederum vom gewählten Modell ab, weshalb auch alleine ein großer Stichprobenumfang kein zuverlässiges Qualitätsmerkmal darstellt.

Unsicherheiten im Tunnelbau

Der Tunnelbau ist ein (in diesem Fall) günstiger Spezialfall. Die Bedingungen sind im erheblichen Maße unvorhersehbar, dennoch sind diesen niemals vollständig zu eliminierenden Unsicherheiten aufgrund der fundierten Ermittlung von Erfahrungswerten / Realdaten (z.B. vergleichbare Bodenverhältnisse bei früheren Projekten) Grenzen gesetzt und wegen

⁹⁸ Vgl. Schwarz, 2014, S.3.

⁹⁹ Vgl. Berner et al., 2008, S.95.

¹⁰⁰ Bauer, 2007, S.635. Format angepasst.

¹⁰¹ Bauer, 2007, S.635: „Die [auf] Baustelle[n ...] ablaufenden Produktionsprozesse führen dazu, dass oft nur weniger als zehn vergleichbare Werte herangezogen werden können, eine viel zu geringe Anzahl, wenn man bedenkt, dass in der Statistik erst bei einem Probenumfang > 100 einigermaßen sichere Aussagen über die Parameter der Grundgesamtheit möglich sind.“

der kurzzyklischen Wiederholung der Bauprozesse sind kurzfristige und tatsächlich vergleichbare Daten verfügbar. Diese kurzzyklischen Wiederholungen sind auch bzgl. der zweiten Forderung hilfreich, da die immer gleichen Prozesse so relativ häufig wiederholt werden und die Stichprobengröße beständig ansteigt und eine bessere Prognose möglich ist. Dieser Umstand ist allerdings erst während der tatsächlichen Ausführung nutzbar. Bei einer genügend großen Anzahl an vergleichbaren Werten ist eine statistische Aussage möglich und es kann von einer aussagekräftigen Näherung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen ausgegangen werden, welche anhand von zwei Parametern zu definieren sind (Standardverteilung). Mit diesen lassen sich der Mittelwert μ und die Varianz σ^2 bestimmen und nach der Vorgabe einer bestimmten statistischen Sicherheit die Grenzen (\pm) der Erfahrungswerte für μ und σ^2 ermitteln.¹⁰²

Für eine statistische Betrachtung des Bauablaufs kann es ausreichen, nur bestimmte, die Vortriebsgeschwindigkeit maßgebend¹⁰³ beeinflussende Prozesse (auf dem Kritischen Weg) zu betrachten, um eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Einhaltens einer bestimmten Vortriebsgeschwindigkeit zu erhalten. Sinkt die Kapazität dieser Prozesse, so sinkt auch die Gesamtkapazität (vgl. Abs. 2.1.4) und die Kosten (z.B. durch Miet-, Lager- oder Stromkosten) steigen an. Fällt einer dieser Prozesse dauerhaft aus, kommt es zum Erliegen des Gesamtprozesses (= Vortrieb). Dies zeigt wie bedeutend es ist, die verschiedenen Prozessarten eindeutig zu definieren und herauszustellen, um die Unsicherheiten im Bauprozess berücksichtigen zu können. Die Definition der Prozesskategorien erfolgt im Kapitel 3.1.

2.2.5 Schwankungen und Störungen im Bauablauf

Insbesondere der Tunnelbau ist durch eine weitgehend maschinelle Fertigung gekennzeichnet, wodurch die Planung des Vortriebs immer mehr den Prinzipien der industriellen Produktion zugrunde liegt. Die einzelnen Teilaufgaben sind mit einem Minimum an Aufwand, in einer vorgegebenen (optimalen) Zeit zu lösen. Jedoch läuft der Vortrieb nicht im Sinne einer für den Baubetrieb modifizierten industriellen Fertigung ab. Die Vorteile der Fließ- und Taktfertigung (für welche in der industriellen Produktion optimale Bedingungen herrschen) werden mit einem nur bedingt elastischen Produktionsapparat (geringe Flexibilität des Bauablaufs) erkaufte. Daraus folgt, dass es bei Eintreten der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Unsicherheiten zu Behinderungen der Produktion kommt, welche wiederum zu erheblichen Störungen des gesamten Vortriebs und damit zwangsläufig zu Mehrkosten führen.¹⁰⁴

Diese Behinderungen des Vortriebs lassen sich aufteilen in Schwankungen und Störungen der Prozesse und damit folglich des geplanten Bauablaufs.

Schwankungen

Der Baubetrieb ist durch den starken Einfluss verschiedener exogener Einflüsse gekennzeichnet. Zu diesen zählen im Tunnelbau die Eigenschaften (Heterogenität) des Baugrundes (= Geologie) und die allgemeinen Standortbedingungen, wie Raumangebot, Zugänglichkeit, Topologie oder Klima. Aufgrund dieser Einflüsse sind die einzelnen Prozesse

¹⁰² Vgl. Bauer, 2007, S.636.

¹⁰³ Händler bezeichnet diese als „festgelegte potentiell bauzeitbestimmende Vorgänge“. Händler, 2018, S.107.

¹⁰⁴ Vgl. ebenda, S.751 f.

gewissen Schwankungen (auch Varianzen¹⁰⁵ oder Fluktuation¹⁰⁶) unterworfen, welche sich nicht vermeiden lassen und als normal angesehen werden müssen.¹⁰⁷

In der folgenden Abbildung werden die Schwankungen des Prozesses X_i durch $\pm \Delta Z$ (Schwankung Prozesszeit) und $\pm \Delta V$ (Schwankung Prozessvollständigkeit) beispielhaft dargestellt. Ein Prozess kann z.B. eine bestimmte Tätigkeit sein, die nach dem Erreichen des Leistungssolls (V_1) weiterhin erbracht wird. Jedoch wird bei einer genauen Planung ein eindeutiges Prozesssoll vorgegeben und die weitere Bearbeitung des Prozesses ist entweder als Verschwendung von Ressourcen (siehe Kapitel 5.2.2) oder als ein für einen späteren Zeitraum geplanter (gleiche Prozessart), aber an diese Stelle vorgezogener Prozess (Y_i) anzusehen, welcher direkt an den ersten Prozess (X_i) bei Z_1 anschließt. In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass positive Schwankungen nur im Bereich der Prozesszeit auftreten, wenn also ein Prozess früher als geplant vollständig erbracht wird.

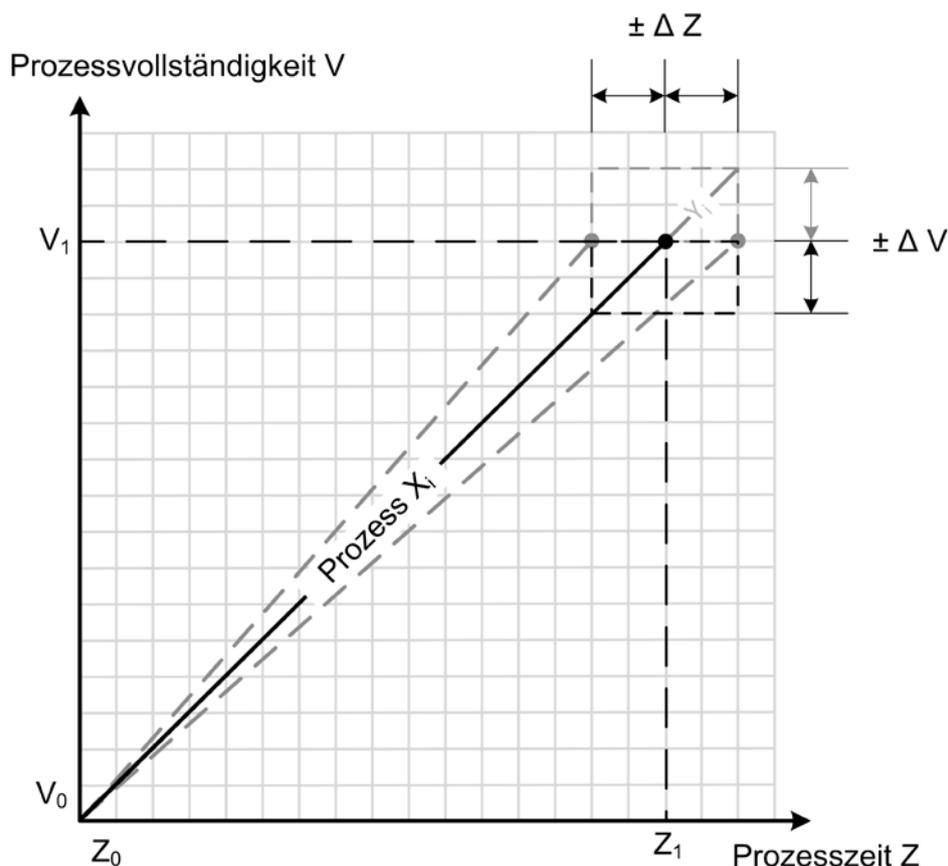


Abb. 8: Schwankungsbereich der Zeit und der Vollständigkeit von Prozess X_i ¹⁰⁸

Störungen

Störungen können „als zeitlich befristete Zustände der Wertschöpfungskette, in denen durch das Einwirken von Störgrößen [...] eine unmittelbar festgestellte Abweichung vom optimalen Prozessverlauf [...] entsteht“¹⁰⁹ definiert werden. Ist die Kapazität

¹⁰⁵ Siehe auch Kapitel 5.4.2.

¹⁰⁶ lat. *fluctuare*, „hin und her schwanken“.

¹⁰⁷ Vgl. Bauer, 2007, S.753.

¹⁰⁸ In Anlehnung an Bauer, 2007, S.753.

¹⁰⁹ Heil, 1995, S.32.

(Prozessgeschwindigkeit, -häufigkeit) eines (realistisch) geplanten Gesamtprozesses (Gesamtfortschritt, Gesamtbetrieb) nicht weiter ohne betriebliche oder finanzielle Maßnahmen zu erreichen, so gilt dieser als gestört.¹¹⁰ Dieser Definition folgend, treten Störungen unerwartet auf und können zu Unterbrechungen bzw. Verzögerungen im Betriebsablauf führen.¹¹¹ Dies ist der Fall, wenn die Schwankungen der einzelnen Prozesse in der Summe zu groß werden oder wenn einzelne Prozesszeiten über den normalen zu erwartenden Schwankungsbereich hinausgehen, wie in Abb. 9 beispielhaft dargestellt wird. Die Gesamtprozessdauer kann entweder aufgrund einer einzelnen Störung (St1 = Behinderung / Verzögerung) oder aufgrund der Summe mehrerer Störungen (im Bsp. zwei Störungen, St2 = Verzögerung und St3 = Unterbrechung) gestört werden.

Unter einer **Behinderung** sind hierbei alle Ereignisse zu verstehen, die den vorgesehenen Leistungsumfang in sachlicher, zeitlicher und räumlicher Hinsicht **hemmen** oder **verzögern**, die Leistung jedoch nicht unmöglich machen. Eine **Unterbrechung** geht über die Hemmung hinaus und führt zu einem **Arbeitsstillstand**.¹¹²

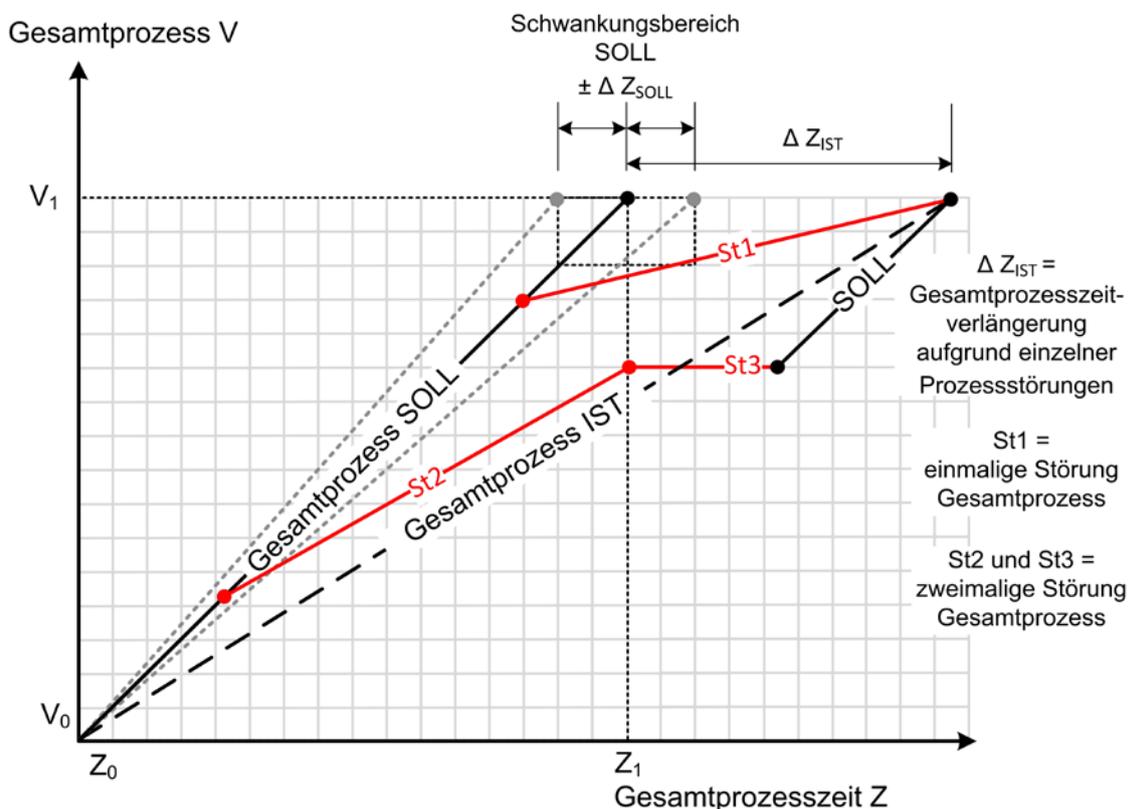


Abb. 9: Gestörter Gesamtprozess - mögliche Störungskombinationen¹¹³

Als eine Störung der Produktion gilt „jedes Ereignis, das den vorgesehenen Leistungsablauf hemmt oder verzögert, so dass [...] die Bauleistung nicht, wie [...] vorgesehen [...] ausgeführt werden] kann.“¹¹⁴

¹¹⁰ Vgl. Bauer, 2007, S.753.

¹¹¹ Vgl. Ullrich et al., 2013, S.46.

¹¹² Vgl. Ingenstau, 2001, S.1289.

¹¹³ In Anlehnung an Bauer, 2007, S.754.

¹¹⁴ Vygen et al., 1994, S.73.

Eine Störung bzw. **Prozessstörung** bezogen auf die Prozesszeit lässt sich somit folgendermaßen definieren:

„Eine zeitliche (Prozess-)Störung ist eine außerplanmäßige Situation, die die Erbringung eines Prozesses nicht in der für ihn geplanten Zeit zulässt. Eine außerplanmäßige Situation kann ein, den geplanten Prozess verhindernder Störprozess sein (= Unterbrechung oder Verhinderung Beginn), oder ein Umstand, der den geplanten Prozess nicht in der geplanten Geschwindigkeit ablaufen lässt (= Verzögerung).“

Störungsursachen

Prozessstörungen bzw. ein gestörter Bauablauf resultieren aus der permanenten Wechselwirkung zwischen Bedarfsanforderungen, Planungen und der tatsächlichen Realisierung. Hierbei entstehen Defizite, welche eine außerbetriebliche Ursache haben können, wenn die Behinderung vom Auftraggeber oder von Dritten verursacht wird und somit außerhalb der Sphäre des Auftragnehmers liegen. Oder sie können aus innerbetrieblichen Problemen resultieren und zählen in diesem Fall zum Unternehmensrisiko.¹¹⁵ Die Hauptursache für den Großteil aller Störungen liegt im Bauproduktionsfaktor „Information“. „Fehlende, sich ändernde, zusätzliche bzw. neue Informationen haben letztlich immer zur Folge, dass sich Verfahrensabläufe verzögern, zum Stillstand kommen, oder unter veränderten Bedingungen wieder aufgenommen werden müssen.“¹¹⁶

Die folgenden Gruppen können als **Störungsursache** auftreten:¹¹⁷

1. Bauherr oder seine Bevollmächtigten

Planungsänderung, Nutzungsänderung, Nutzungserweiterung, Terminänderung, Fehlangaben, fehlende Genehmigungen, verspätete / keine Bereitstellung Grundstück, Baustopp, etc.

2. Unternehmer oder seine Subunternehmer

Lieferschwierigkeiten, Verzug Subunternehmer, Kapazitätsengpass, Inventarprobleme (Maschinen- oder Anlagenausfall, unzureichende Logistik- oder Lagerflächen, defekte Transportmittel), ungeeignetes Gerät oder Personal, Arbeitsvorbereitung, etc.

3. Außerordentliche Umstände

(unnormale) Witterungseinflüsse, Unwetter, Personalausfälle, Brand, Naturkatastrophe, etc.

4. Arbeitsobjekt (insbesondere beim Tunnelbau)

Baugrund (Wasserandrang, wechselnde Bodenkategorien, Bodendurchlässigkeit, Hohlräume)

Mit dem in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodell soll der tatsächliche Ablauf des Produktionsprozesses optimiert werden, weshalb alle Arten der Störprozesse betrachtet werden, bei welchen es sich um für Baustellen relativ typische Störungen handelt. Das Modell wird so eingerichtet, dass jeder Nutzer die für ihn sinnvollsten (Stör-)Prozesse bezogen auf die Störungsursachen auswählen bzw. anlegen kann.

¹¹⁵ Vgl. Vygen et al., 1998, S.113, vgl. Greiner et al., 2005, S.188 f., vgl. Kraatz, 2015, S.1.40.

¹¹⁶ Greiner et al., 2005, S.190.

¹¹⁷ Vgl. Bauer, 2007, S.756.

Möglichkeiten zur Anpassung des Bauablaufs im Störfall

Nahezu alle Bauzeitverlängerungen führen zu (erheblichen) Mehrkosten. Und auch die Beschleunigungsmaßnahmen zum Wiederaufholen der durch eine Behinderung verlorene Zeit durch den Einsatz zusätzlicher Arbeitskräfte bzw. Maschinen oder Geräte führen i.d.R. zu Mehrkosten und zu Qualitätsverlusten durch bspw. Nachbesserungsarbeiten, Terminüberschreitungen oder Personalfuktuation.¹¹⁸

Es bieten sich verschiedene Möglichkeiten zur kurzfristigen Anpassung des Bauablaufes an, um auf die Schwankungen und Störungen zu reagieren und den Terminplan weiterhin einzuhalten. Zu diesen zählen die bekannten zeitlichen, quantitativen und intensitätsmäßigen Anpassungen sowie die in dieser Arbeit beschriebene Anpassung durch Potentialverschiebungen.¹¹⁹ Der Effekt, welcher durch die Steuerungs- bzw. Beschleunigungsmaßnahmen erreicht werden soll, ist in Abb. 10 dargestellt.

1. Kapazitätsanpassung

Die Kapazität des Personals und der Geräte wird erhöht, um unter Beibehaltung des gewählten Verfahrens den Ablauf schneller bewerkstelligen zu können. Möglichkeiten hierfür sind die Einführung eines Mehrschichtbetriebs, die Änderung (Erhöhung oder Verringerung) der täglichen oder wöchentlichen Arbeitszeit oder der Einsatz von leistungsfähigerem Personal bzw. Gerät.

Den **zeitlichen und quantitativen Anpassungen** durch die Erhöhung der täglichen Arbeitszeit mittels Überstunden, eines Mehrschichtbetriebes oder der Erhöhung des Potentialeinsatzes durch zusätzliche Arbeiter, Arbeitskolonnen, Maschinen, Geräte oder Bauhilfsstoffe sind aus arbeitsrechtlicher Sicht und durch die Gewerbeaufsicht (z.B. Verbot der Nachtarbeit in Wohngebieten) Grenzen gesetzt.¹²⁰

2. Fertigungsanpassung

Es erfolgt eine Anpassung der Produktionsorganisation durch die Änderung (Erhöhung oder Verringerung) der Anzahl der Fertigungspunkten bzw. Produktionsstellen, durch die Änderung des geplanten Produktionsablaufs (z.B. andere bzw. schnellere Bauverfahren, Arbeitsabfolge bzw. Herstellungsreihenfolge von Fertigungsabschnitten, Änderung der Größe von Fertigungsabschnitten) oder durch die überlappende Ausführung der bisher in Normalfolge ausgeführten Vorgänge. Die Gesamtbauzeit wird jedoch nur dann verkürzt, wenn die terminkritischen Vorgänge überlappt ausgeführt werden.¹²⁰

3. Anpassung Intensität

Die Anpassung erfolgt durch die Erhöhung des Leistungsvermögens der Bauproduktionsfaktoren. Diese Variante ist i.d.R. auszuschließen, da davon auszugehen ist, dass bspw. Maschinen auf dem Kritischen Weg, wie auch Arbeiter mit ihrer annähernd maximalen Kapazität eingeplant (richtig auf den Sollablauf abgestimmt) sind.¹²¹

¹¹⁸ Vgl. Vygen et al., 1998, S.113 und vgl. Greiner et al., 2005, S.189.

¹¹⁹ Vgl. Kraatz, 2015, S.6.13 und vgl. Berner et al., 2008, S.69.

¹²⁰ Vgl. Bauer, 2007, S.761 ff.

¹²¹ Vgl. Bauer, 2007, S.762.

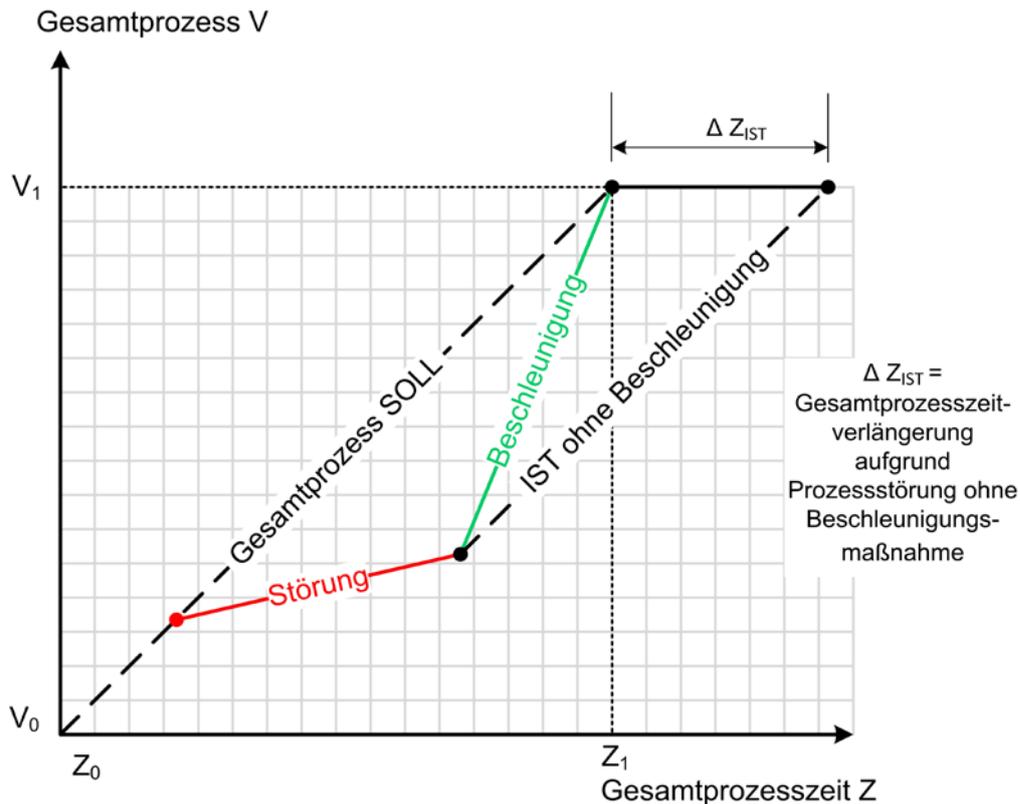


Abb. 10: Gesamtprozess SOLL und IST - Mit und ohne Beschleunigungsmaßnahme

4. Anpassung durch Potentialverschiebung

Die Anpassung erfolgt durch die Verschiebung freier Potentiale. Als Potentiale können ungenutzte Bauproduktionsfaktoren gesehen werden. Dies sind an dieser Stelle beispielsweise Personal, Maschinen oder Flächen. Für diese Maßnahme reicht ein grober Blick auf den Gesamtprozess nicht aus. Es müssen hierfür die einzelnen Prozesse ganzheitlich und detailliert betrachtet werden, um mögliche freie Potentiale zu erkennen. Diese können ggf. erst aufgrund von Störungen entstehen. Bauer sieht in den „Umstellungen im Gesamtablauf einer Baustelle (Ändern von Herstellungsreihenfolgen und / oder Beanspruchungen von Pufferzeiten) [...]“¹²², das Problem, dass hierfür die notwendige Zeit für die Umplanung fehlt.

Dieses Problem soll durch das systematische Suchen und Aufzeigen (Vorschlagen) freier Potentiale mithilfe des Prozessmodells behoben werden.

Die Anpassung durch die Potentialverschiebung soll im Folgenden an einem einfachen Beispiel erläutert werden.

Beispiel Potentialverschiebung

Es sei ein Gesamtprozess gegeben, der aus sechs Teilprozessen (P1 bis P6) erbracht wird. Die Planung ergibt, dass die in Abb. 11 dargestellte Anordnung unter den gegebenen Vorgaben (Tabelle 1) die sinnvollste Anordnung ist. Diese Vorgaben sind bedingt durch die notwendige bzw. natürliche Abfolge der Arbeiten und durch die Möglichkeit, Prozesse parallel ablaufen zu lassen, wenn dies die Umstände (Personal, Maschinen, Werkstoffe, Flächen, etc.) erlauben.

¹²² Bauer, 2007, S.761.

	Vorgaben		Parallel möglich zu
P1	Muss Beginn sein	SA = Z_0	P3
P2	Möglichst früh auszuführen	FA = Z_0 ; SE = Z_1 ; NF = P3	P3, P4
P3	Muss auf P2 folgen	NF = P4	P1, P2, P4
P4	Muss auf P3 folgen		P2, P3
P5	Innerhalb des Gesamtprozesses erbringen	FA = Z_0 ; SE = Z_1	-
P6	Innerhalb des Gesamtprozesses erbringen	FA = Z_0 ; SE = Z_1	-

Tabelle 1: Beispiel Potentialverschiebung - Vorgaben Prozesse¹²³

Aus den gegebenen Vorgaben ergibt sich folgender Gesamtprozessablauf SOLL:

Prozessvolumen V

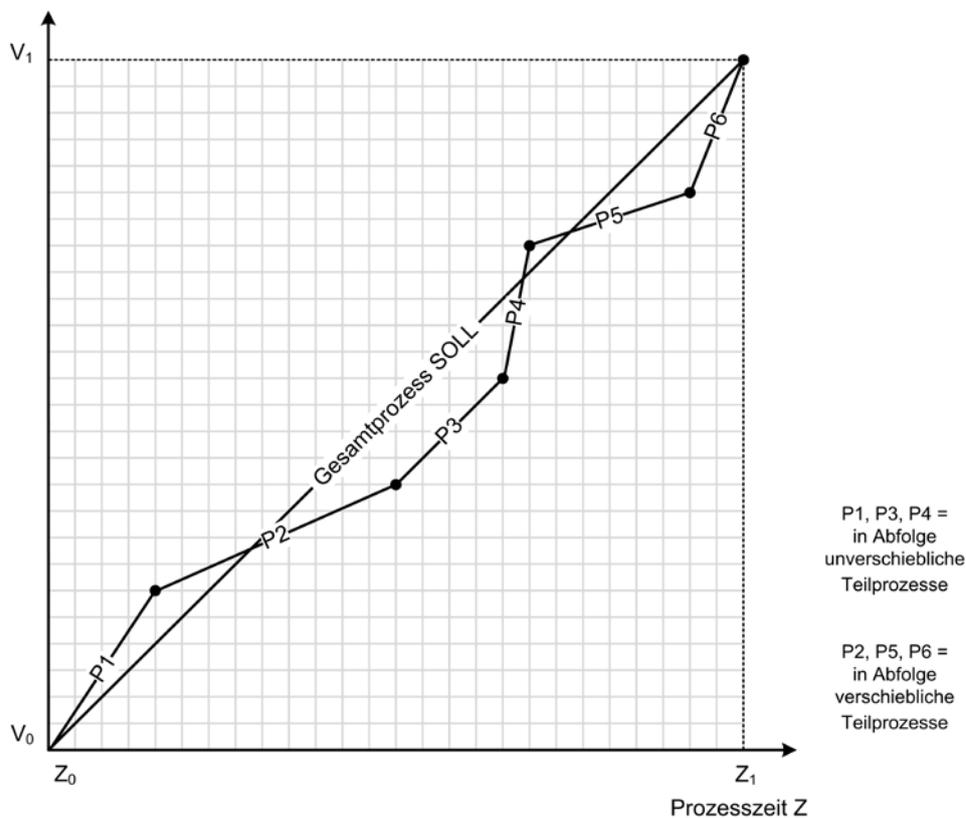


Abb. 11: Beispiel Potentialverschiebung - SOLL

Wie in Abb. 12 dargestellt, kommt es zu einer Störung (Verhinderung Beginn) von Teilprozess P2. Ohne (kostspielige) Beschleunigungsverfahren oder eine Anpassung der Prozessabfolge ergibt sich eine Gesamtprozesszeitverzögerung von ΔZ_{IST} , welche der Dauer der Störung entspricht.

¹²³ SA = Spätester Anfang, SE = Spätestes Ende, NF = Nachfolgerprozess.

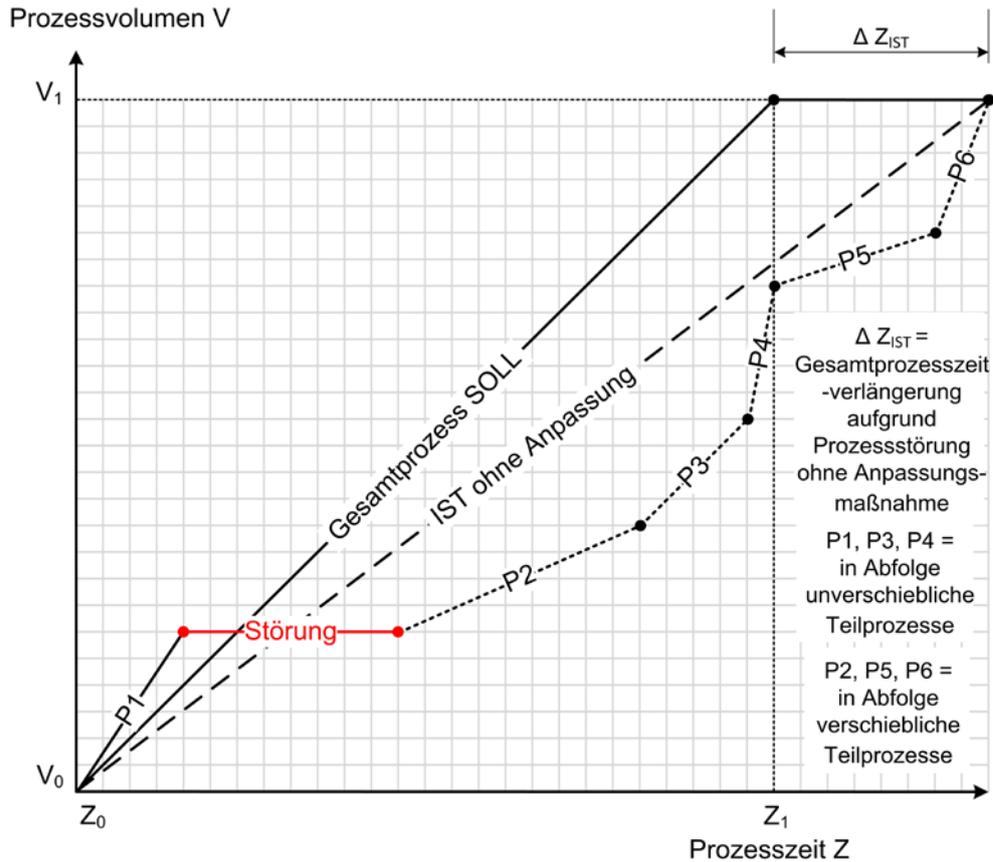


Abb. 12: Beispiel Potentialverschiebung - IST gestört

Durch die Analyse der Vorgaben unter den neuen Umständen aufgrund der aufgetretenen Störung ergibt sich die Möglichkeit einer Anpassung. P2 soll so früh wie möglich ausgeführt werden. Seine Ausführung wird jedoch durch die Störung verhindert. P3 kann noch nicht ausgeführt werden, da er auf P2 folgen muss. Ebenso P4, der auf P3 folgen muss. P5 und P6 sind an keine Abfolge gebunden, sie müssen lediglich innerhalb des Gesamtprozesses ausgeführt werden ($FA = Z_0$, $SE = Z_1$). Da ihre Ausführung jedoch nicht parallel zu einem anderen Prozess erfolgen kann, wurden sie nach den anderen Prozessen eingeplant. Während der Störung kann keiner dieser anderen Prozesse ausgeführt werden (P1 ist bereits erbracht, P2, P3 und P4 sind wegen der Abfolge nicht möglich). Somit hat sich ein Potential ergeben, welches nun nach vorne, in die Zeit der Störung verschoben werden kann. Wie in Abb. 13 dargestellt, kann auf diese Weise, im optimalsten Fall¹²⁴ die Gesamtprozesszeitverlängerung ausgeglichen werden. Die Abfolge der Teilprozesse ist in diesem Fall nicht mehr optimal, jedoch lässt sich so eine zeitliche Verzögerung verhindern bzw. einschränken.

¹²⁴ Die für die Umplanung bzw. das Eingeben in das Prozessmodell benötigte Zeit bleibt an dieser Stelle unberücksichtigt.

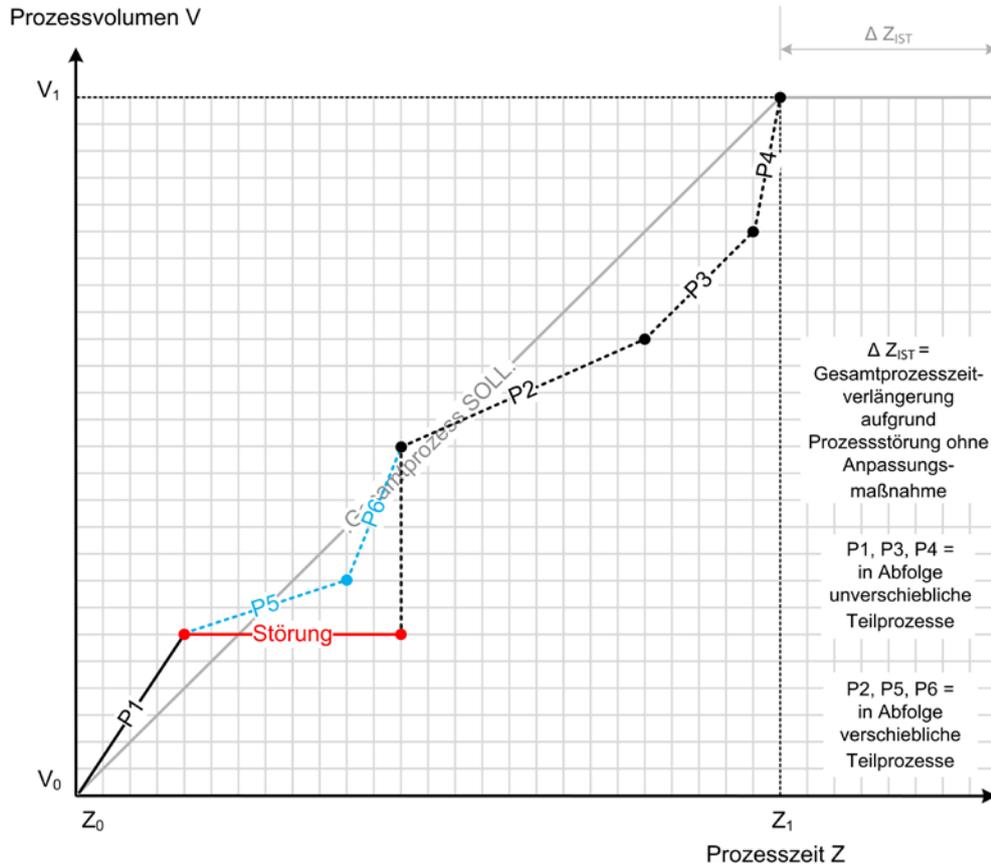


Abb. 13: Beispiel Potentialverschiebung - IST gestört, Anpassung Abfolge

Welche Arten von Prozessen es gibt, welche dieser sich für eine Potentialverschiebung eignen und welche Kennzahlen für die Ermittlung einer möglichen Potentialverschiebung notwendig sind, wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

Wert-Box 02: Einordnung in die Themenstellung und Wert für das Prozessmodell

Um die **Ablauf- bzw. Terminplanung** zur Kommunikation und Steuerung im Prozessmodell nutzen zu können, werden je nach Zweck **Terminlisten** (zum Abgleichen und Berechnen der Prozessdaten), **Balkenplänen** (zur Visualisierung der Prozesseigenschaften und -anordnung) und **Netzplänen** (zur Visualisierung von Prozessabfolgen, Parallelitäten, Überlappungen und Soll-Ist-Vergleichen) verwendet.

Mit Hilfe der **Anordnungsbeziehungen** werden die Verknüpfungen bzw. Abhängigkeiten der Vorgänge beschrieben. Liegen Prozesse auf dem Kritischen Weg (Bearbeitungszeit der verbundenen und voneinander abhängigen Vorgänge kann nicht verlängert werden, ohne die Gesamtzeit zu verlängern, da keine Pufferzeiten vorhanden sind), sind sie meist in einer **Normalfolge** oder in einer **Anfangsfolge** zu leisten. Prozesse, die nicht auf dem Kritischen Weg liegen und einen **Puffer** haben, sind in einem bestimmten Zeitrahmen zu erbringen. Sie haben einen frühesten Anfang oder ein frühestes Ende und können ggf. auch zu einem spätesten Anfang begonnen oder zu einem spätesten Ende abgeschlossen werden.

Da die Bauproduktion unter exogenen und endogenen Einflüsse, in einem zeitlich begrenztem Fenster und unter einmaligen Bedingungen zu erbringen ist, sind die aus früheren Projekten ermittelten Aufwands- und Leistungswerte sowie die Terminplanung **mit Unsicherheiten behaftet**. Dies gilt sowohl für den Hochbau wie auch im besonderen Maße für den Tunnelbau, da für diesen weder eine einheitliche noch eine genaue Erkundung der **Geologie** möglich ist. Bauprozesse sind somit als **stochastische Prozesse** zu bezeichnen. Aufgrund der verschiedenen exogenen Einflüsse sind die einzelnen Prozesse gewissen **Schwankungen** (auch Varianzen oder Fluktuation) unterworfen, welche sich nicht vermeiden lassen und **als normal angesehen** werden müssen. Ist die angestrebte Kapazität eines Prozesses nicht weiter ohne betriebliche oder finanzielle Maßnahmen zu erreichen, so gilt dieser als **gestört**. Die Prozessdauer kann entweder aufgrund einer einzelnen Störung oder aufgrund der Summe mehrerer Störungen nicht erreichbar sein. Eine zeitliche Prozessstörung ist hierbei eine außerplanmäßige Situation, die die Erbringung eines Prozesses nicht in der für ihn geplanten Zeit zulässt.

Nahezu alle Möglichkeiten zur **Anpassung** des **Bauablaufs** im Störfall durch **Beschleunigungsmaßnahmen** (Anpassung der Kapazität, der Intensität oder der Fertigung) führen zu **Mehrkosten** und zu Qualitätsverlusten. Eine Anpassung durch **Potentialverschiebung** sieht Bauer problematisch, da für die Umstellungen des Gesamtablaufs die notwendige Zeit für die Umplanung fehlt. Dieses Problem soll durch das systematische Suchen und Aufzeigen (Vorschlagen) **freier Potentiale**, welche in Form von bspw. beschäftigungslosem Personal, ungenutzten Maschinen oder freien Arbeitsflächen auftreten, mithilfe des Prozessmodells behoben werden.

2.3 (Bau-)Prozessmanagement

Wie im Abs. 2.1 dargestellt, handelt es sich bei Bauproduktionen um dynamische Systeme, die nicht selbstregulierend sind und somit permanent kontrolliert und gesteuert werden müssen. Es wurde herausgestellt, dass die Bauproduktion als Wertschöpfungsprozess bzw. als Transformationsprozess bezeichnet werden kann.

In den folgenden Abschnitten soll ein Verständnis für die Vorgänge der Prozessoptimierung mit dem späteren Prozessmodell geschaffen werden. Hierzu wird erläutert, was generell unter einem Prozess zu verstehen ist, welche Arten zu unterscheiden sind und im Prozessmodell Anwendung finden werden, wie diese kontrolliert und gesteuert werden können und welche Voraussetzungen hierfür gegeben sein müssen.

Prozessorientierter Ansatz

Prozessmanagement wird sowohl von *Motzko* (bezogen auf das Bauen) wie auch von *Ahlrichs* und *Knuppertz* (universell gesehen) als die Tätigkeit beschrieben, anhand welcher alle Prozesse an den übergeordneten Unternehmenszielen ausgerichtet werden sollen.¹²⁵ Jedoch sind viele Unternehmen aus organisatorischer Sicht eher funktionsorientiert aufgebaut. Aus dieser Struktur ergibt sich automatisch das Bestreben jeder Funktionseinheit, das Maximum für ihren Bereich zu generieren. Dieses angestrebte lokale Maximum bedeutet in den meisten Fällen das Minimum an Kosten. Der Fokus wird auf die Einzelprozesse gelegt. Jedoch kann die Summe der optimierten Einzelprozesse nicht mit dem Optimum des Gesamtprozesses gleichgesetzt werden.¹²⁶ *Kletti* sieht sogar mögliche negative Auswirkungen von **Einzelprozessoptima**, welche den Gesamtprozess belasten.¹²⁶ Es sind also nicht einzelne Strukturen (z.B. einzelne Abteilungen, Teilprozesse) in den Vordergrund zu stellen, sondern der Gesamtprozess (= Netzwerk von Aktivitäten), der ein spezifisches Kundenproblem löst.¹²⁷

Aus diesem Grund ist das Verständnis zusammenhängender Prozesse als ein System von besonderer Bedeutung. Dieser prozessorientierte Ansatz lässt die Zusammenhänge und Wechselbeziehungen der Prozesse erkennen und diese so steuern, dass die **Gesamtleistung** verbessert werden kann. Hierbei sind die Anforderungen an die Prozesse und deren Einhaltung zu berücksichtigen und die Prozesse im Hinblick auf ihre jeweilige Wertschöpfung zu betrachten. Auf diese Weise lässt sich eine wirksame Prozessleistung erreichen und Verbesserungen der Prozesse anhand von Daten und Informationen durchführen.¹²⁸ Der mit der ganzheitlichen Orientierung an den Prozessen erreichte Vorteil ist, dass zwangsläufig die vor- und nachgelagerten Bereiche (Prozesse) mit einbezogen werden müssen. Auf diese Weise entsteht eine **Kundenorientierung**, da die jeweiligen Anforderungen des folgenden Prozesses (Prozesskunde) erfüllt werden müssen.¹²⁹

¹²⁵ Vgl. Motzko, 2013, S.6 f., vgl. Ahlrichs & Knuppertz, 2010, S.10.

¹²⁶ Vgl. Kletti, 2011, S.37.

¹²⁷ Vgl. Weiß et al., 2015, S.58.

¹²⁸ Vgl. DIN 9000, 2015, S.10 f. Ziffer 0.3.1.

¹²⁹ Vgl. Weiß et al., 2015, S.60.

Die folgenden Definitionen stellen dar, was hierbei unter einem Prozess zu verstehen ist.

Prozess

- Nach *DIN EN ISO 9000:2000* ist ein Prozess ein „Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet.“¹³⁰
- Nach *Weiß et al.* ist ein Prozess die „raumzeitliche Realisierung einer Funktion, welche sich aus dem Bezug zum spezifischen Zweck ergibt, im Rahmen von bestimmten Strukturen bzw. eine Input-Output-Beziehung beschreibt.“¹³¹
- Nach *VDI-Richtlinie 3633 - Blatt 1* wird ein Prozess definiert als die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden.“¹³²
- *Davenport* definiert einen Prozess unter Berücksichtigung der zeitlichen und örtlichen Komponenten als „[...] eine spezifische Anordnung von Tätigkeiten über einen bestimmten Zeitraum und Ort, mit einem Anfang, einem Ende und klar identifizierten Inputs und Outputs.“¹³³

Zusammenfassend wird ein Prozess zeitlich durch einen **Prozessanfang** und ein **Prozessende** bestimmt. Jegliche Eingaben können als Prozessstartereignis den **Input** darstellen, welcher durch **Transformation** (unter Anwendung der notwendigen Produktionsfaktoren) in den **Output**, das Prozessergebnis umgewandelt wird.¹³⁴ Dieses Output stellt die **Prozessleistung** dar, welche je nach Art des Prozesses materiell oder immateriell sein kann.

2.3.1 Prozessmanagement

Die Tätigkeit des Prozessmanagements (PM) ist mittlerweile in allen Branchen eine etablierte Aufgabe, über deren Bedarf es keine Diskussionen gibt. Jede Unternehmung, welche sich durch arbeitsteilige und folglich komplexe Strukturen auszeichnet, bedarf eines PM. Somit kommt der Berücksichtigung des PM auch bei Bauprojekten eine große Bedeutung zu. Das PM beschreibt *Gadatsch* als einen zentralen Bestandteil des Geschäftsprozess- und Workflow-Managements, wobei es die Aufgaben der Abstimmung zwischen der Unternehmensstrategie, der organisatorischen Prozessgestaltung und der technischen Prozessumsetzung erfüllt.¹³⁵

Speziell auf die Bauwirtschaft bezogen sieht *Motzko* das PM als die Summe aller strategischen, organisatorischen, operativen und technologischen Maßnahmen, welche notwendig sind, um die Unternehmensziele und speziell das Ziel der Kundenzufriedenheit zu erreichen.¹³⁶

¹³⁰ DIN 9000, 2015, S.33, Ziffer 3.4.1.

¹³¹ Weiß et al., 2015, S.60 (Satzbau angepasst).

¹³² VDI, 2018, S.3.

¹³³ Eigene Übersetzung von Davenport, 1993, S.5: „A process is [...] a structured, measured set of activities, [...] a specific ordering of work activities across time and place with a beginning, an end, and clearly identified inputs and outputs.“

¹³⁴ Vgl. Corsten, 1996, S.9.

¹³⁵ Vgl. Gadatsch, 2012, S.1.

¹³⁶ Vgl. Motzko, 2013, S.6 f.

Auch *Ahrlrichs* und *Knuppertz* erkennen in der Erfüllung der Kundenanforderungen das wesentliche Ziel eines Prozesses.¹³⁷ Sie stellen weiterhin dar, dass alle Prozesse übergeordnet zusammenhängen und allgemein als Geschäftsprozesse angesehen werden können. Jedoch sehen sie eine Einteilung der Prozesse in unterschiedliche Prozessarten zur Charakterisierung ihres jeweiligen Zwecks als erforderlich an. Die grobe Einteilung sieht dabei drei Prozessarten vor:

1. Führungs- oder Managementprozesse,
2. Leistungs- oder Kernprozesse
3. und Unterstützungs- oder Supportprozesse.¹³⁸

Hinzu kommen die zur Behebung von Störungen notwendigen „Störprozesse“ sowie die den Störungen entgegenwirkenden und die Störprozesse koordinierenden Steuerungsprozesse.

2.3.2 Prozessarten

1. Die **Führungs- oder Managementprozesse** sind i.d.R. kontinuierliche und sich wiederholende Prozesse und stellen die oberste Ebene der notwendigen Geschäftsprozesse dar, da sie der übergeordneten Organisationsstruktur, der projektübergreifenden Zielausrichtung und der mittel- und langfristigen strategischen Ausrichtung auf die Kunden, Produkte und Leistungen dienen und durch die Vorgabe von Richtlinien und Regeln den Rahmen für das operative Handeln vorgeben.¹³⁹
2. Die **Leistungs- oder Kernprozesse**¹⁴⁰ stellen die Ebene der marktorientierten, projektspezifischen und unikaten Teilprozesse und der tatsächlichen Wertschöpfung (originären Produktherstellung) dar, da diese der unmittelbaren Erfüllung der Kundenaufträge (Leistungsziele) und somit dem für den Kunden wahrnehmbaren Nutzen dienen.¹⁴¹
3. Die **Unterstützungs- oder Supportprozesse** stellen die zum einen für den externen Kunden uninteressanten und unsichtbaren Geschäftsprozesse dar, da diese nicht dem direkten Kundennutzen bzw. der Marktleistung dienen. Zum anderen unterstützen sie den internen Prozesskunden, da sie für die erfolgreiche Umsetzung der Leistungs- oder Kernprozesse notwendig und somit unabdingbar sind.¹⁴²

¹³⁷ Vgl. Ahrlrichs & Knuppertz, 2010, S.10.

¹³⁸ Vgl. ebenda, S.11.

¹³⁹ Vgl. Motzko, 2013, S.7, vgl. Ahrlrichs & Knuppertz, 2010, S.11, vgl. Girmscheid, 2014, S.XLII.

¹⁴⁰ Auch Produktions- und Leistungserstellungsprozesse, vgl. Girmscheid, 2014, S.XLII.

¹⁴¹ Vgl. Motzko, 2013, S.7, vgl. Ahrlrichs & Knuppertz, 2010, S.11, vgl. Girmscheid, 2014, S.XLII. Zimmermann definiert die Leistungsprozesse analog als „Prozesse, die zur Erfüllung einer Zielerforderung unbedingt benötigt werden. Leistungsprozesse dienen dabei allein der Vorbereitung (Planung des Bauwerks) und Durchführung der physischen Herstellung (Bauausführung) der geforderten Bauleistung. In: Zimmermann, 2011, S.2-19.

¹⁴² Vgl. Motzko, 2013, S.8, vgl. Ahrlrichs & Knuppertz, 2010, S.11, vgl. Girmscheid, 2014, S.XLII.

4. Störprozesse

Wie im Abs. 2.2.5 beschrieben, handelt es sich bei einer Prozessstörung um eine außerplanmäßige Situation, die die Erbringung eines Prozesses bzw. des Gesamtprozesses behindert bzw. verzögert und diesen nicht in der für ihn geplanten Zeit zulässt. Die Behebung einer solchen Prozessstörung ist eine nicht wertschöpfende Tätigkeit und wird als ein Störprozess bezeichnet, der den geplanten Prozess nicht in der geplanten Geschwindigkeit ablaufen lässt, da er ihn unterbricht (= Unterbrechung oder Verhinderung Beginn des Prozesses) oder verzögert. Da Störungen außerplanmäßig auftreten, muss auf sie reagiert werden. Dieses Eingreifen ist zu den nicht wertschöpfenden Tätigkeiten zu zählen.¹⁴³ Die Thematik der nicht wertschöpfenden Prozesse stellt das Hauptaugenmerk des Lean Gedankens dar und wird ausführlicher im Kapitel 5.2.2 erläutert.

Zusammenfassend lässt sich ein **Störprozess** wie folgt definieren:

„Ein Störprozess lässt sich zeitlich durch einen Prozessanfang und ein Prozessende bestimmen. Ab seinem Prozessstartereignis (= Auftreten einer Störung) unterbricht oder verhindert er die Ausführung eines anderen geplanten Prozesses maßgeblich, sodass dieser seine Prozessleistung nicht in der für ihn vorgesehenen Zeit, Art und Weise erbringen kann. Er verhindert bis zu seinem Prozessende (= Beheben der Störung) die Wertschöpfung.“

5. Steuerungsprozesse

Im Bereich der Führungs-/Managementprozesse sind die Steuerungsprozesse zu ergänzen, welche jedoch auf der Ebene der Leistungserbringung innerhalb eines spezifischen Projektes ablaufen und „der effizienten und optimierten Abwicklung der Leistungserbringung hinsichtlich Kosten, Terminen und Qualität dienen.“¹⁴⁴ Ihnen können alle Leistungen zugeordnet werden, die der Abstimmung und Anpassungen dienen. Sie wirken auf die Leistungs-, Unterstützungs- und Störprozesse ein und stellen sicher, dass diese zur Erreichung des angestrebten Leistungsergebnisses (Soll Output) führen.¹⁴⁵

¹⁴³ Vgl. Kletti, 2011, S.31.

¹⁴⁴ Zimmermann, 2011, S.2-19.

¹⁴⁵ Vgl. Vocke, 2016, S.75.

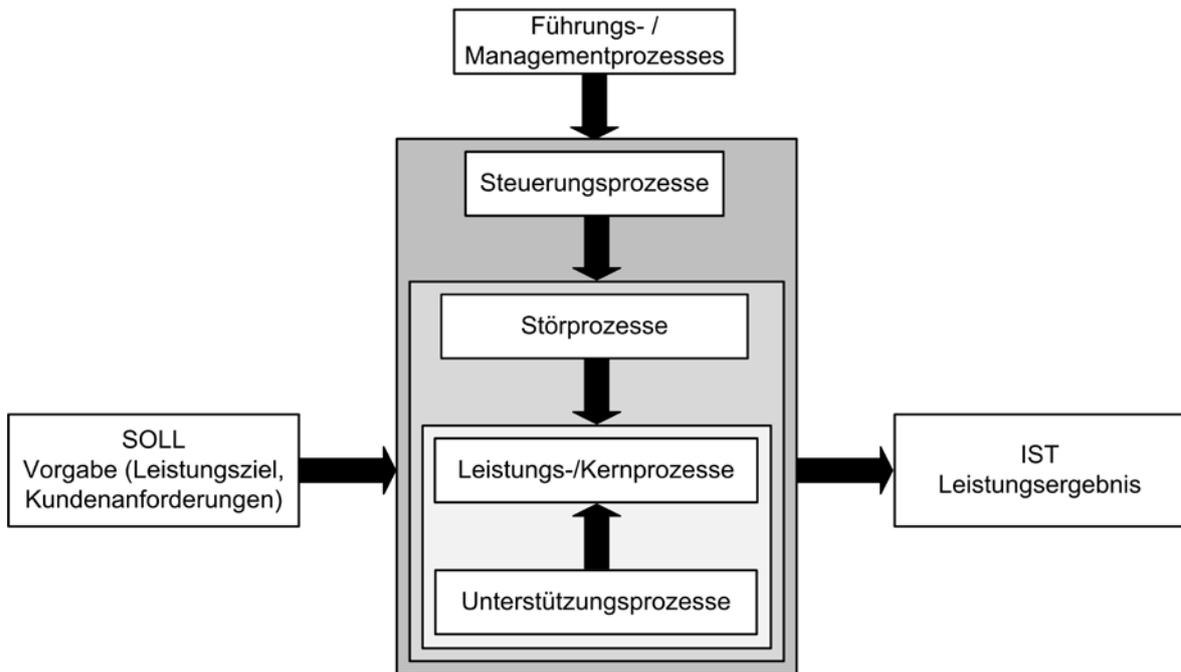


Abb. 14: Prozessarten des Bauprozessmanagements¹⁴⁶

Wert-Box 03: Einordnung in die Themenstellung und Wert für das Prozessmodell

Prozessmanagement wird als die Tätigkeit beschrieben, anhand welcher alle Prozesse an den übergeordneten Unternehmenszielen ausgerichtet werden sollen. Der Fokus wird jedoch i.d.R. auf die **Einzelprozessoptima** gelegt, was jedoch sogar zu negative Auswirkungen für den Gesamtprozess führen kann. Deshalb ist das Verständnis zusammenhängender Prozesse (Zusammenhänge und Wechselbeziehungen der Prozesse) als ein System von besonderer Bedeutung, um die **Gesamtleistung** verbessern zu können. Auf diese Weise entsteht eine **Kundenorientierung**, da die jeweiligen Anforderungen des folgenden Prozesses (auch des Prozesskunde) erfüllt werden müssen.

Die Prozesse lassen sich hierbei in die Prozessarten **Führungs- / Managementprozesse** (i.d.R. kontinuierliche, sich wiederholende P. zur strategischen Ausrichtung), **Leistungs- / Kernprozesse** (P. der tatsächliche Wertschöpfung), **Unterstützungs- / Supportprozesse** (für den externen Kunden uninteressanten, unterstützen den internen Prozesskunden, da sie für die Umsetzung der Leistungs- oder Kernprozesse notwendig sind) sowie **Störprozesse** (unterbrechen / verhindern die Ausführung eines anderen geplanten P., sodass dieser seine Leistung nicht in der für ihn vorgesehen Zeit, Art und Weise erbringen kann. Verhindern bis zur Behebung der Störungen die Wertschöpfung) und die **Steuerungsprozesse** (dienen der effizienten und optimierten Abwicklung der Leistungserbringung hinsichtlich Kosten, Terminen und Qualität) einteilen.

¹⁴⁶ Eigene Darstellung in Anlehnung an Motzko, 2013, S.8, Ahlrichs & Knuppertz, 2010, S.12, Vocke, 2016, S.75.

3 Strukturierung und Zielstellung Prozessmodell

Die im vorhergehenden Kapitel dargestellten Prozesse einer Bauproduktion werden in diesem Kapitel strukturiert, um ein prozessorientiertes Modell entwickeln zu können. Mit Hilfe dieses Modells sollen die Reaktionen auf Störungen standardisiert und geregelt ausfallen. Um dies zu ermöglichen, ist es notwendig, zu jedem Zeitpunkt zu wissen, welcher Prozess vorrangig ist, um die Gesamtprozessproduktivität zu optimieren. In einem ersten Schritt sind hierfür die unterschiedlichen Prozesskategorien zu definieren und zu beschreiben, um die folgende weiterführende Forschungsfrage beantworten zu können:

**Ist es jederzeit möglich,
den Prozess zu identifizieren,
der für die Produktivitätsoptimierung
maßgebend ist?**

Die Kategorisierung erfolgte durch die Orientierung an der Werterzeugung der Prozesse in Abs. 3.1.1. Die Kategorien werden im Abs. 3.1.2 ausführlich beschrieben und es werden Beispiele aus verschiedenen Baubereichen dargelegt.

Die Optimierung der Produktivität findet in drei Schritten bezogen auf die Situation und die dabei auftretenden unterschiedlichen Prozesskategorien statt. Diese Schritte sind kontinuierlich zu wiederholen und den aktuellen Bedingungen und Informationen anzupassen. Die Aufteilung und die Einordnung des Prozessmodells in diese Schritte werden näher im Abs. 3.2 erläutert. Hierbei wird dargestellt, dass eine Störung (außerplanmäßige Situation) zum dritten Schritt der Optimierung der Produktivität führt. Die Berücksichtigung der ungeplanten Situation und der durch diese verursachten (neuen) Bedingungen sind das Hauptaugenmerk des entwickelten Prozessmodells.

Um jederzeit - und insbesondere in einer außerplanmäßigen Situation - bestimmen zu können, welcher Prozess Priorität hat damit der Gesamtprozess optimiert wird, wird im Abs. 3.3 der Begriff des Leitprozesses eingeführt und eingehend erläutert.

Im Abs. 3.4 erfolgt aus den identifizierten Problemen und Aufgaben die Definition des Zielsystems für das Prozessmodell.

3.1 Definition Prozesskategorien

Um das Ziel der Bauproduktion - den zielorientierten Einsatz der Bauproduktionsfaktoren, zur möglichst ökonomischen Erbringung des Wertes für den Kunden (= Leistungssoll) - zu erreichen, sind eine systematische Suche und das Aufzeigen freier Potentiale mithilfe des Prozessmodells nötig. Um dies zu ermöglichen, sind die auftretenden Prozesskategorien eindeutig zu definieren. Die Kategorisierung ist der Zielstellung folgend an der Werterzeugung der einzelnen Prozesse zu orientieren. Sowohl in der Produktion der stationären Industrie wie auch bei der Bauproduktion können die auftretenden Prozesse gemäß der Kategorisierung von Tätigkeiten¹⁴⁷ in drei Prozesskategorien aufgeteilt werden.

Kategorien von Tätigkeiten

- Tätigkeiten, welche aus Sicht des Kunden **tatsächlich Wert erzeugen**.
- Tätigkeiten, welche aus Sicht des Kunden **keinen Wert direkt erzeugen**, aber für die Werterzeugung **notwendig sind** (Muda Typ I).
- Tätigkeiten, welche aus Sicht des Kunden **keinen Wert erzeugen** und **entfernbar** sind (Muda Typ II).¹⁴⁸

3.1.1 Prozesskategorien

Die Prozesskategorien werden gemäß ihres jeweiligen Bezugs zur Werterzeugung wie folgt benannt:

1. Direkt Werterzeugende Prozesse (**DWEP**) - Schlüsselprozesse (SP)
2. Indirekt Werterzeugende Prozesse (**IWEP**) - Unterstützungsprozesse (UP)
3. Nicht-Werterzeugende Prozesse (**NWEP**) - Störprozesse (StP)

Um die Ablaufschema im Folgenden übersichtlicher zu gestalten, werden den Prozesskategorien die Farben Rot, Gelb und Grün zugeordnet:

Direkt Werterzeugende Prozesse	DWEP	Schlüsselprozesse (SP)
Indirekt Werterzeugende Prozesse	IWEP	Unterstützungsprozesse (UP)
Nicht-Werterzeugende Prozesse	NWEP	Störprozesse (StP)

Tabelle 2: Farbschema Prozesskategorien¹⁴⁹

¹⁴⁷ Eine ausführliche Erläuterung erfolgt im Kapitel 5 zu Lean Construction.

¹⁴⁸ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.51; Muda bedeutet auf Japanisch Verschwendung und wird näher im Kapitel 5.2.2 erläutert.

¹⁴⁹ Das Farbschema hat sich aus der Farbzurordnung zu den Prozessen bei *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG (W&F)* ergeben. Die Ausgangsbasis für das entwickelte Prozessmodell stellen Daten aus den Unterlagen von *W&F* dar. Das Prozessmodell fand zu seiner Validierung Anwendung in einem Projekt von *W&F*, weshalb zur Erhöhung der intuitiven Handhabung des Modells, die bekannten Farben verwendet wurden. Später wird der Vortrieb mit Rot gekennzeichnet und der Rohreinbau mit Blau. Ein Beispiel für ein Schichtprotokoll von *W&F* ist in Anlage 3 gegeben.

3.1.2 Beschreibung der Prozesskategorien

DWEP / Schlüsselprozess (SP)

Ein DWEP oder Schlüsselprozess (SP) liegt i.d.R. auf dem **Kritischen Weg** (Parallelitäten möglich), erzeugt einen **tatsächlichen Wert** und ist mitbestimmend für die **Gesamtkapazität**.

Sinkt die Kapazität (= Dauer und Häufigkeit) des DWEP, so sinkt auch die Gesamtkapazität und die Kosten (z.B. durch Miet-, Lager- oder Stromkosten) steigen an. Fällt ein DWEP dauerhaft aus, kommt es zum Erliegen des Gesamtprozesses. Somit haben alle Aktivitäten **Priorität**, die dafür sorgen, dass die DWEP gemäß ihrer möglichen Kapazität ausgeführt werden können.

Beispiele DWEP bei verschiedenen Bauverfahren

DWEP im Erdbau:¹⁵⁰

- Lösen
- Laden
- Einbauen
- Verdichten

DWEP bei der Erstellung einer Stahlbetonwand:

- Schalen
- Bewehren
- Betonieren

DWEP im Sprengvortrieb:¹⁵¹

- Bohren
- Sprengen
- Bewettern
- Schüttern
- Sichern
- Vermessen

¹⁵⁰ Vgl. Bauer, 2007, S.521.

¹⁵¹ Ausführliche Erläuterungen zum Sprengvortrieb folgen im Kapitel 6.4.

IWEP / Unterstützungsprozess (UP)

Ein IWEP oder Unterstützungsprozess (UP) wird auch als **systembedingte Ausfallzeit** bezeichnet und **senkt** die mögliche **Gesamtkapazität**, sobald er die Ausführung eines DWEP auf dem Kritischen Weg verhindert und **nicht parallel** zu diesem ausgeführt werden kann. Dies ist aufgrund seiner **Notwendigkeit** (z.B. Kontrolle, Reinigung) teilweise unvermeidbar. Er erzeugt somit **keinen direkten Wert**, ist jedoch für die Werterzeugung unabdingbar. Ein IWEP ist zwingend auszuführen, jedoch ist (in vielen Fällen) der Zeitpunkt seiner Ausführung (individuell für jeden Prozess) in einem bestimmten Rahmen flexibel.¹⁵² Wird ein nicht notwendiger IWEP ausgeführt und verhindert die Ausführung eines DWEP oder eines notwendigen IWEP, so wird er begrifflich zu einer Störung bzw. einem NWEF.

Beispiele IWEP bei verschiedenen Bauverfahren

IWEP bei einem Hochbauprojekt:

- Vermessungsarbeiten
- Prüfarbeiten
- Wartungs- / Kontroll- / Inspektionsarbeiten an Maschinen / Geräten¹⁵³
- Entladearbeiten
- Arbeitsvorbereitung
- Offizielle (vorgeschriebene) Pausen
- Aufräumarbeiten

IWEP beim Sprengvortrieb:

- Leitungsbau
- Abtransport Abraum
- Sohlräumung
- Nachziehen Versorgungsleitungen
- Reinigung und Wartung Gerätschaften
- Verlängerung Lutte
- Entleeren Abraumdeponie
- Wartungs- / Kontrollarbeiten Maschinen / Geräte

IWEP beim Straßenbau:

- Absperrung
- Bitumenanlieferung
- Nachbearbeitung Fahrbahn
- Vermessung

Zeitunkritische IWEP

Prozesse die den IWEP zuzuordnen sind, jedoch nicht zeitkritisch oder ressourcenbezogen die Erbringung eines DWEP oder notwendigen IWEP beeinflussen.

¹⁵² In der Netzplantechnik (siehe 2.2.3) wird diese Flexibilität mit „Frühester (möglicher) Anfang“ (FA) und „Spätestes (mögliches) Ende“ (SE) beschrieben.

¹⁵³ Zur präventiven Störungsverhinderung.

NWEP / Störprozesse (StP)

Ein NWEP oder Störprozess (StP) wird auch als **nicht-systembedingte Ausfallzeit** bezeichnet. Es handelt sich um einen **unplanmäßigen Stillstand** eines geplanten Prozesses, aufgrund der notwendigen Behebung einer Störung. Die **Ausführung** des geplanten Prozesses wird **maßgeblich unterbrochen** oder **verhindert**, sodass dieser seine Prozessleistung nicht in der für ihn vorgesehenen Zeit, Art und Weise erbringen kann. Ein NWEP verhindert bis zu seinem Prozessende (= Behebung der Störung) die Wertschöpfung.

Ein NWEP (bzw. möglichst bereits die Störung selbst) ist **unter allen Umständen zu vermeiden**, da er die meiste Verschwendung in Form von Verzögerungen und Kosten (= kein Wert) verursacht.

Es gibt auch NWEP die nicht direkt die Wertschöpfung verhindern, also weder einen DWEP noch einen IWEP stören. Jedoch binden diese NWEP Ressourcen (= Kosten) ohne, dass durch sie ein Wert erzeugt wird, und stellen somit eine Verschwendung dar. Sie verhindern indirekt die Wertschöpfung.

Zu den NWEP zählen für jede (Bau-)Projektart:

- Behebung von Betriebsstörungen / defekter Maschinen
- Beschaffung von / Suche nach fehlenden Betriebsmitteln / Werkstoffen
- Wartezeiten wegen Verzögerungen / inoffizieller Pausen / Personalabwesenheit
- Wartezeit wegen besonderer Ereignisse (Hebungen, Wetter, Hochwasser)
- Nacharbeiten / Mängelbehebung

Kategoriewechsel von NWEP zu IWEP

Im entwickelten Prozessmodell werden die (gesammelten) Informationen bzgl. der NWEP (z.B. Häufigkeit der Störungsursache) verwendet, um beispielsweise das erneute Auftreten einer Störung abschätzen zu können. Um schwerwiegendere Störungen des Gesamtprozesses durch bspw. ein defektes Maschinenteil (lange Lieferzeit) zu verhindern, werden diese Informationen genutzt, um präventive Kontrollen / Überprüfungen / Inspektionen / Wartungen durchzuführen, sollte dies die Ablaufplanung zulassen. Die NWEP werden in diesem Fall begrifflich zu einem IWEP.

Beispiel NWEP Betriebsstörung Schneidrad

Wird dieser Prozess ausgeführt, um eine Betriebsstörung des Schneidrads zu beheben, handelt es sich um einen NWEP.

Wird dieser Prozess während der Behebung einer anderen Störung (keine Betriebsstörung des Schneidrads vorhanden) als präventive Kontroll- bzw. Inspektionsmaßnahme durchgeführt, handelt es sich begrifflich um einen IWEP.

3.2 Prozesskategorien zur Produktivitätssteigerung in drei Schritten

Die Optimierung der Prozesse zur Steigerung der Produktivität und somit zur Steigerung der Gesamtprozesskapazität lässt sich unter Berücksichtigung der drei Prozesskategorien auf drei Schritte aufteilen. Diese drei Schritte sind kontinuierlich zu wiederholen und den aktuellen Bedingungen und Informationen anzupassen. Die ersten beiden Schritte sind unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Unsicherheiten weitgehend planbar, da die notwendigen Prozesse bekannt sind. Der dritte Schritt bedingt die Steuerung, da hierbei ungeplante Prozesse auftreten. Dieser Schritt ist das Hauptaugenmerk des entwickelten Prozessmodells.

1. Schritt: Alle DWEP zur direkten Werterzeugung werden isoliert betrachtet und optimiert. Hierbei werden die einzelnen Tätigkeiten, notwendigen Ressourcen (Personal, Maschinen, Werkzeuge), Abläufe, Handgriffe, etc. analysiert und optimiert (bzgl. Zeit, Ressourcen, Qualität). Auch die Schwankungen der Prozesse sind zu berücksichtigen und aktuelle Informationen sind bei der Wiederholung des 1. Schrittes zu verwenden.

2. Schritt: Es werden zusätzlich die IWEP zur indirekten Werterzeugung betrachtet und für diese der 1. Schritt durchgeführt. Außerdem werden die Abhängigkeiten aller DWEP und IWEP analysiert und die Abfolge bzw. Anordnung und Ressourceneinteilung optimiert, sodass alle DWEP gemäß der maximalen Kapazität ausgeführt werden können. Auch die Schwankungen der Prozesse sind zu berücksichtigen und aktuelle Informationen sind bei der Wiederholung des 2. Schrittes zu verwenden. Dies führt zur Steigerung der Produktivität und somit zur Steigerung der Gesamtprozesskapazität.

3. Schritt: Es werden die außerplanmäßigen NWE, welche die Werterzeugung verhindern berücksichtigt. Hierbei sind die Abhängigkeiten aller Prozesse neu zu analysieren und die Abfolge bzw. Anordnung und Ressourceneinteilung zu optimieren, sodass alle DWEP gemäß der maximalen Kapazität ausgeführt werden können. Dies führt zur Optimierung der Produktivität und somit zur Steigerung der Gesamtprozesskapazität, unter den gegebenen Bedingungen des Störfalles.

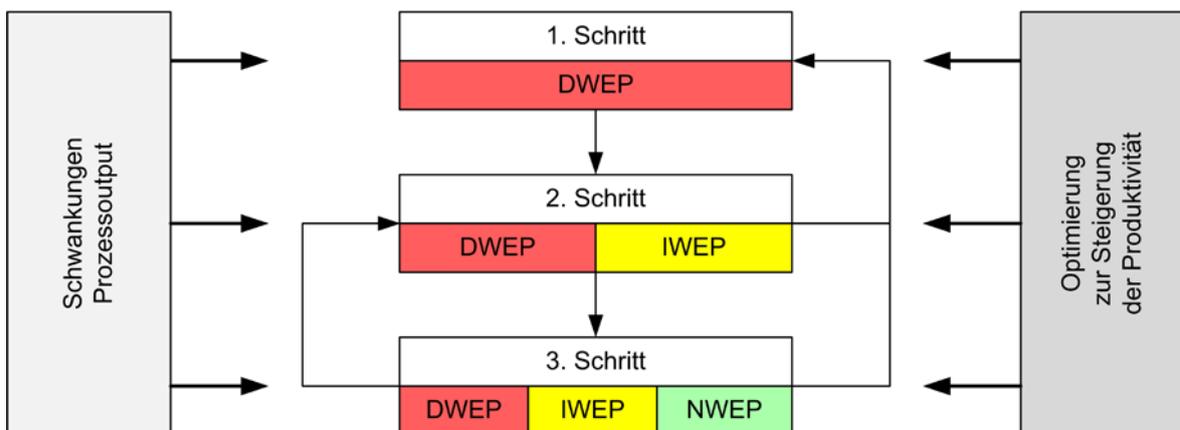


Abb. 15: Drei Schritte zur Produktivitätssteigerung

3.3 Leitprozess

Da zu jedem Zeitpunkt im Gesamtprozess einzelne Prozesse der drei unterschiedlichen Kategorien auftreten können (ob geplant = 1. und 2. Schritt oder ungeplant = 3. Schritt), ist eine eindeutige Regelung notwendig, um zu klären, welcher Prozess zu diesem spezifischen Zeitpunkt Priorität hat, also auszuführen bzw. zu beheben ist, damit der Gesamtprozess optimiert wird. Aus diesem Grund wird der Begriff des **Leitprozesses (LP)**¹⁵⁴ eingeführt. Der Leitprozess wird wie nachfolgend definiert und seine Ermittlung ist grafisch für einen DWEP in Abb. 16 und für n DWEP in Abb. 17 veranschaulicht.

Definition Leitprozess (LP)

Ist die Ausführung eines Direkt Werterzeugenden Prozesses (DWEP) **möglich**, so ist dieser der Leitprozess. Ist die Ausführung eines DWEP **nicht** möglich, ist der Prozess, welcher die Ausführung eines DWEP verhindert, der Leitprozess. Dieser kann entweder ein notwendiger Indirekt Werterzeugender Prozess (IWEP) oder ein Nicht-Werterzeugender Prozess (NWEPP) sein. Die Ausführung des Leitprozesses hat die **höchste Priorität**.

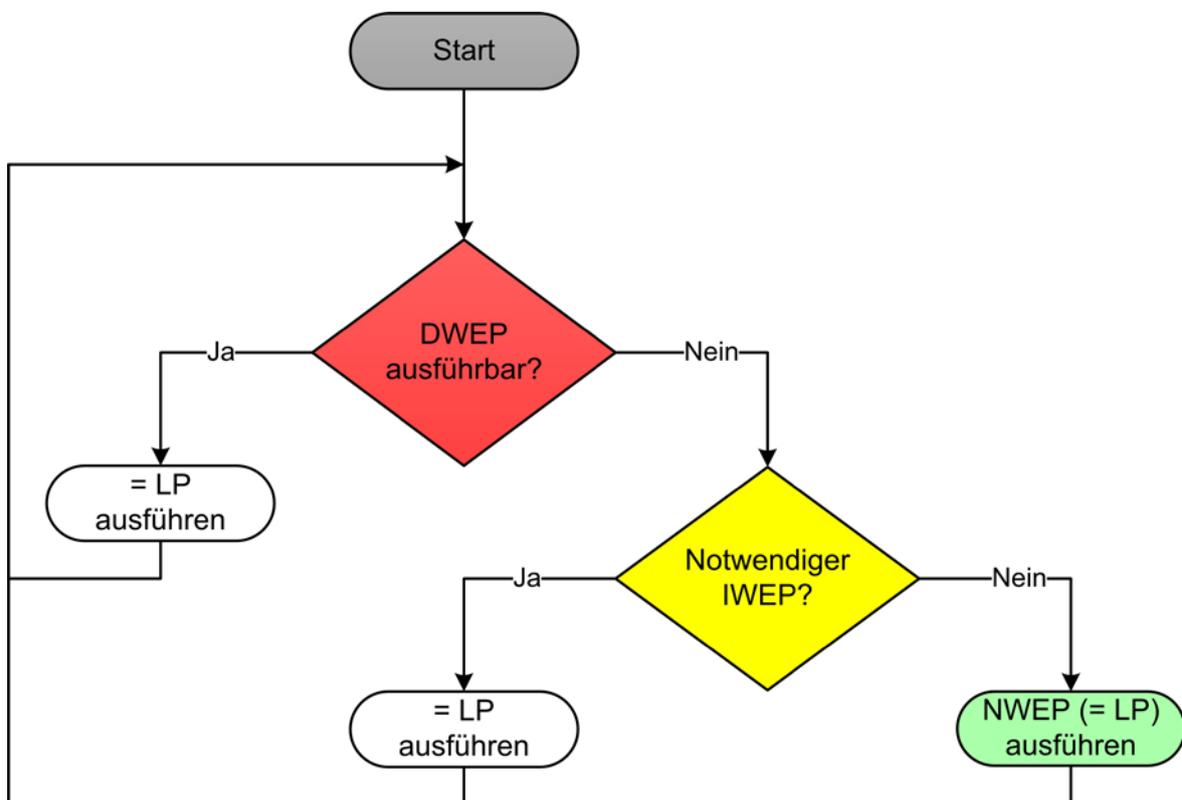


Abb. 16: Flussdiagramm - Identifizierung Leitprozess mit einem DWEP

¹⁵⁴ Der Begriff „Leitprozess“ wird in ähnlicher Weise von Bauer (siehe Bauer, 2007, S.637) beschrieben: „Der Leitprozess, auf den bei einer Taktfertigung alle Teilprozesse abzustimmen sind, wird vom Leitbetrieb ausgeführt, der den Fertigungsengpass bildet. Dies kann [...] die teuerste Maschine (bzw. Gerät) sein, für die ein weitgehend störungsfreier Arbeitsablauf gesichert werden muss, eine Maschine (bzw. Gerät) mit begrenzter Arbeitsgeschwindigkeit oder eine begrenzte Anzahl an Arbeitskräften. Der Leitprozess liegt auf dem Kritischen Weg, weist keine Pufferzeiten auf und lässt somit keine Verzögerungen zu, ohne dass der Endtermin des Projekts überschritten wird.“

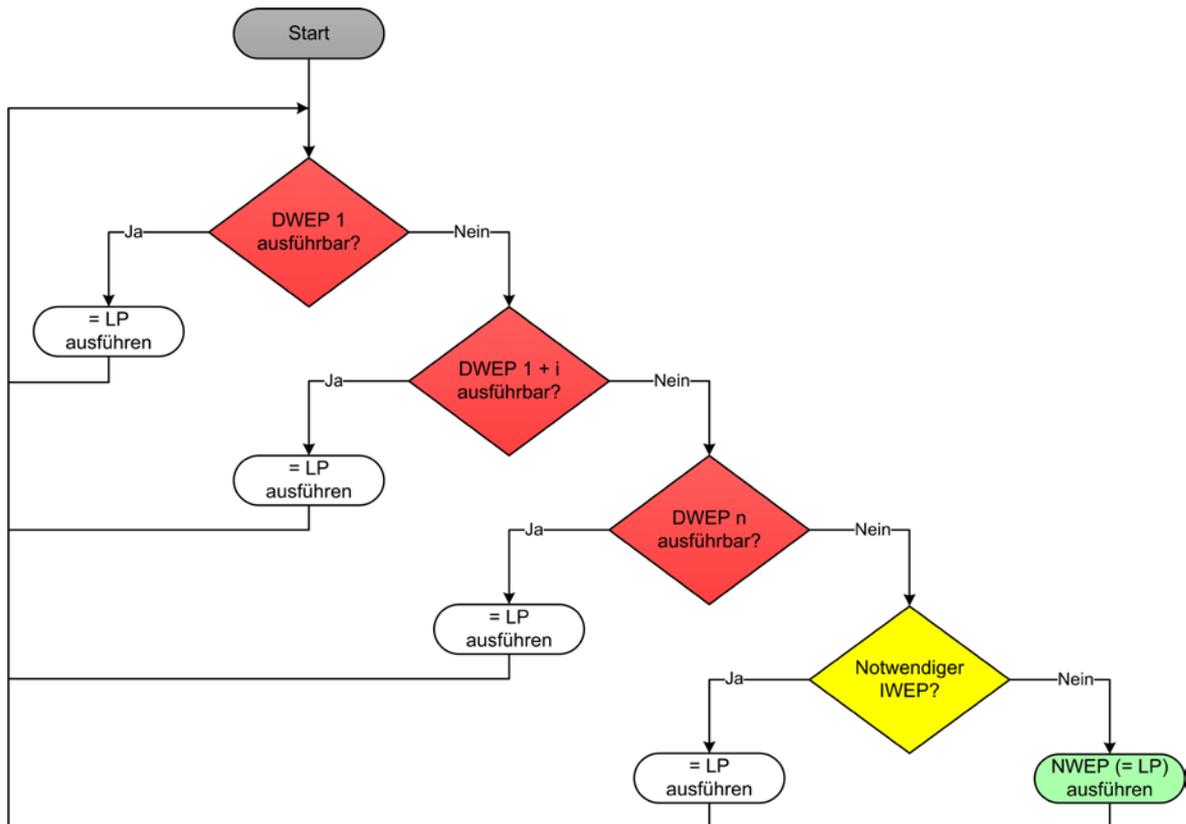


Abb. 17: Flussdiagramm - Identifizierung Leitprozess mit n DWEPE, mit $i = 1$ bis $n - 2$

Die DWEPE liegen i.d.R. auf dem Kritischen Weg (ggf. zwei oder mehr DWEPE parallel ausführbar, siehe Kapitel 7.3) und somit stellt immer ein DWEPE den Leitprozess (LP) dar, sollte seine Ausführung möglich sein. Hierbei sind die DWEPE für den Baufortschritt zwingend notwendig und bzgl. ihrer zeitlichen Durchführung nicht flexibel verschiebbar (= Ausführung sobald möglich), ohne dass hierdurch negative Folgen für den Gesamtprozess entstehen.

Ist die Ausführung eines IWEP parallel zum jeweiligen Leitprozess möglich (z.B. werden keine Ressourcen des Leitprozesses gebunden), liegt dieser nicht auf dem Kritischen Weg und ist bedenkenlos parallel ausführbar. Dieser Fall wird ebenfalls im Kapitel 7.3 behandelt.

Zu beachten ist, dass die Ausführung eines IWEP, dessen Ausführung nicht parallel zum jeweiligen Leitprozess möglich ist, im falschen Zeitraum und bei zu unflexibler zeitlicher Eintaktung (z.B. ist ein früherer oder späterer Beginn möglich, wird jedoch nicht berücksichtigt), die Gesamtprozesskapazität maßgeblich stören kann (durch die Behinderung / Nicht-Ausführung des Leitprozesses).

3.4 Herleitung der Ziele des Prozessmodells

Das Ziel, welches übergeordnet mit dem Prozessmodell erreicht werden soll, ist die Steigerung bzw. Optimierung der Produktivität. Für den Aufbau des Modells und die Ausrichtung der Maßnahmen ist diese Zielvorgabe jedoch zu abstrakt, weshalb ein Bündel von (Unter-)Zielen zu definieren ist, anhand welcher das Ziel der **Produktivitätsoptimierung** erreicht werden kann. Im folgenden Abschnitt werden einige, für die Zieldefinition notwendige Annahmen getroffen und die verschiedenen Ziele, welche mit dem Prozessmodell erreicht werden sollen, hergeleitet.

Beim **dritten Schritt** zur Produktivitätssteigerung werden die **außerplanmäßigen Störungen** in Form der **NWEP** berücksichtigt. Bei diesem Schritt wird eine **Steuerung** aufgrund der neuen, **ungeplanten** Bedingungen notwendig. Wegen der Störung und ggf. wegen der nicht optimalen Maßnahmen zur Behebung bzw. Verringerung dieser Störung, sinkt die Kapazität der DWEP und damit die Produktivität der Bauproduktion.

Ausgangspunkt der Herleitung der Ziele ist die Betrachtung der möglichen Zustände, in welchen sich eine Bauproduktion befinden kann:

- **Erster Zustand:** Ausführung eines DWEP ist möglich.
- **Zweiter Zustand:** Ein notwendiger, nicht parallel zu einem DWEP ausführbarer IWEP ist notwendig und möglich.
- **Dritter Zustand:** Weder Zustand eins noch Zustand zwei sind möglich. Ursache für den Stillstand ist eine Störung, die einen NWEP bedingt.

Jegliche Störprozesse, welche den dritten Zustand bedingen, bedeuten Verschwendung mit Sicht auf das Projektziel. Deshalb sind diese zu minimieren, eine gänzliche Vermeidung ist jedoch unwahrscheinlich. Es handelt sich bei einem Bauprojekt um ein von äußeren und inneren Einflüssen abhängiges Projekt. Diese Einflüsse sind nur bedingt kontrollierbar. Beispielsweise können Wartezeiten, welche durch die verspätete Lieferung eines durch Stau aufgehaltenen LKWs verursacht werden, nur eingeschränkt durch größere Pufferzeiten (wirtschaftlich und auf den Projektfortschritt bezogen) sinnvoll eingeplant werden. Ein defekter Meißel, welcher den Vortrieb zum Erliegen bringt, kann nur in Grenzen durch regelmäßige, präventive Kontrollen verhindert werden. Beide Ursachen für Stillstand (innere und externe Faktoren) dürfen nicht unberücksichtigt und unbehandelt bleiben.

Verschwendung durch Nichtnutzung neuer Potentiale

*Zu beachten ist, dass durch Stillstand und den damit verbundenen Ausfall eines DWEP oder notwendigen IWEP (erster und zweiter Zustand), **Potential** in Form von Ressourcen (Personal, Maschinen, Raum, Zeit) **freigesetzt** wird, welches für diese verhinderten / aufgeschobenen Prozesse eingeplant war.*

Die Nichtnutzung dieses Potentials stellt ebenfalls eine Verschwendung dar.

Unter Berücksichtigung der Zustandsuntergliederung, wurden für die Entwicklung und Zielsetzungen des Prozessmodells die folgenden, aufeinander aufbauenden **Annahmen** getroffen:

1. *Um die Produktivität zu erhöhen, ist es Ziel des Bauunternehmens, die Kosten für die Erstellung des Bauwerks so gering wie möglich zu halten.*
2. *Die Kosten werden umso geringer, je schneller das Bauwerk bei gleichem oder geringerem Ressourceneinsatz erstellt wird. Somit ist es Ziel des Bauunternehmens, das Projekt so schnell wie möglich unter Einhaltung der Zielvorgaben bzgl. der Qualität und Sicherheit fertigzustellen.*¹⁵⁵
3. *Die Kapazität der DWEP bestimmt den Gesamtfortschritt, mit welchem die Erstellung des Bauwerks vorangeht.*

Diese Annahmen führen zu folgender **Erwartung**:

„Je öfter und schneller die DWEP ausgeführt werden können (= Optimierung ihrer Kapazität), desto schneller wird das Bauwerk fertiggestellt.“

Anhand dieser Annahme wird die folgende **Forderung an das Prozessmodell** gestellt:

„Die Kapazität des Bauablaufs (= Gesamtprozess) soll optimiert werden, indem die DWEP gemäß ihrer maximal möglichen Kapazität ausgeführt werden (= so oft wie möglich und so lange wie möglich).“

Aus dieser Forderung ergeben sich die **Ziele**, welche mit dem Prozessmodell erreicht werden sollen:

- **Ziel 1:** *Sicherstellung, dass die DWEP gemäß ihrer maximal möglichen Kapazität (= so oft wie möglich, so lange wie möglich) ausführbar sind.*
- **Ziel 2:** *Sicherstellung, dass zu jedem Zeitpunkt, der zu priorisierende Prozess herausgestellt werden kann (= Leitprozess), damit entweder Ziel 1 erfüllt wird oder nach einem Stillstand erfüllt werden kann.*
- **Ziel 3:** *Sicherstellung, dass während eines Stillstandes weitere, zukünftige, die Kapazität der DWEP und der notwendigen - nicht parallel zu den DWEP ausführbaren IWEP - verringernde, stillstandverursachende Prozesse (IWEP / NWEPE) ermittelt werden und diese, falls möglich, parallel in der Zeit des aktuellen Stillstands ausgeführt werden.*

¹⁵⁵ Diese Annahme gilt speziell für den Tunnelbau (siehe Kapitel 6). Für andere Projektarten können andere bzw. weitere Faktoren die Kosten beeinflussen.

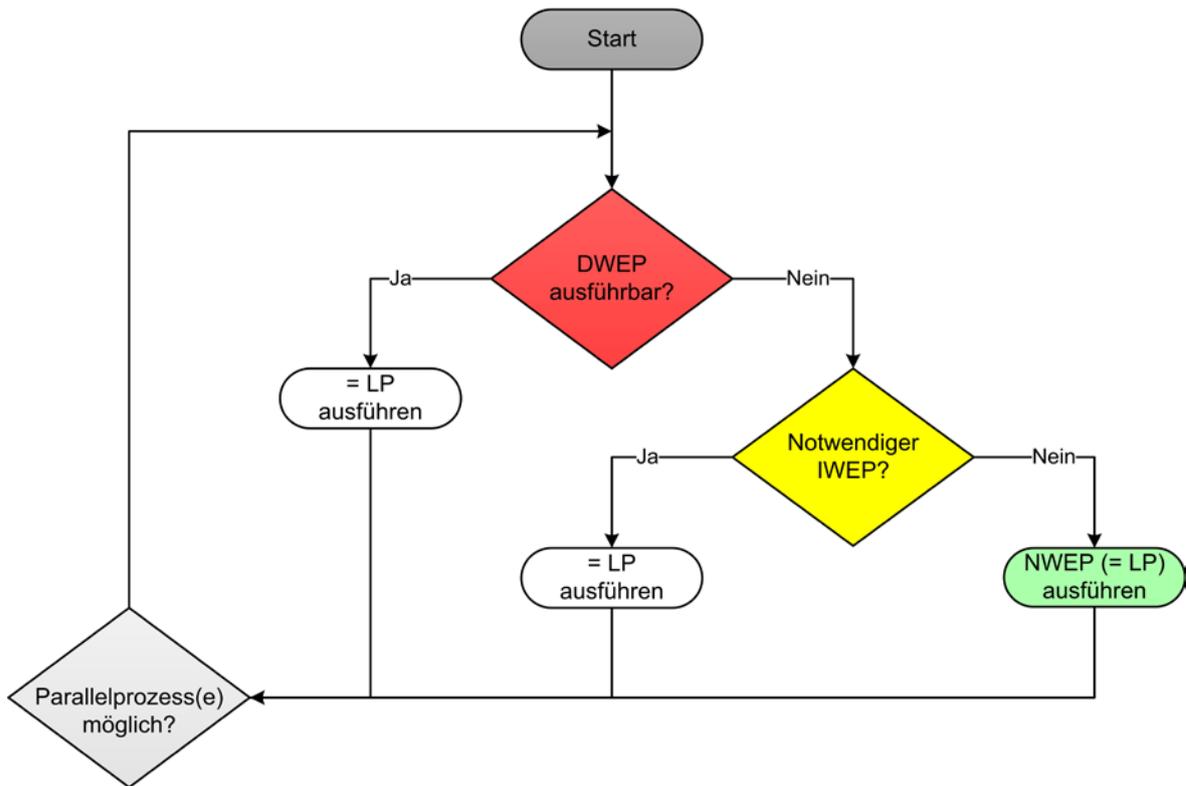


Abb. 18: Flussdiagramm zum Ziel 3 Parallele Ausführung zukünftiger Prozesse

Um diese Zielstellungen zukünftig (kurzfristig, innerhalb des Projektes; langfristig, für andere Projekte) zunehmend genauer erreichen zu können, ergibt sich ein weiteres Ziel des Prozessmodells:

- **Ziel 4:** Sicherstellung, dass alle Prozessdaten (= Ursache, Häufigkeit, Dauer und Ressourcenverbrauch) - insbesondere der stillstandverursachenden Prozesse - ermittelt, analysiert, dokumentiert, zukünftig (umgehend) berücksichtigt und verwendet werden.

Die Ziele werden zusammenfassend in der folgenden Grafik dargestellt und in Abb. 20 in Zusammenhang mit den Forschungsfragen gesetzt.

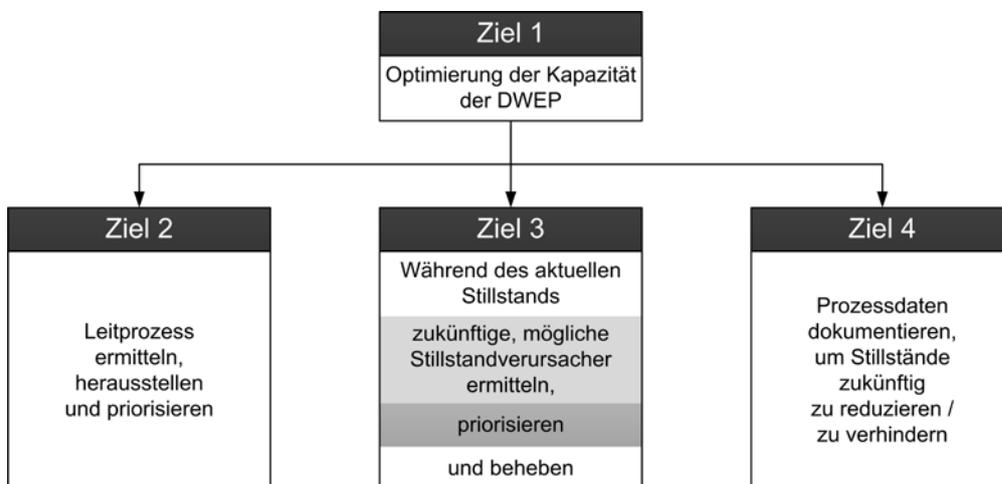


Abb. 19: Zielsystem Prozessmodell

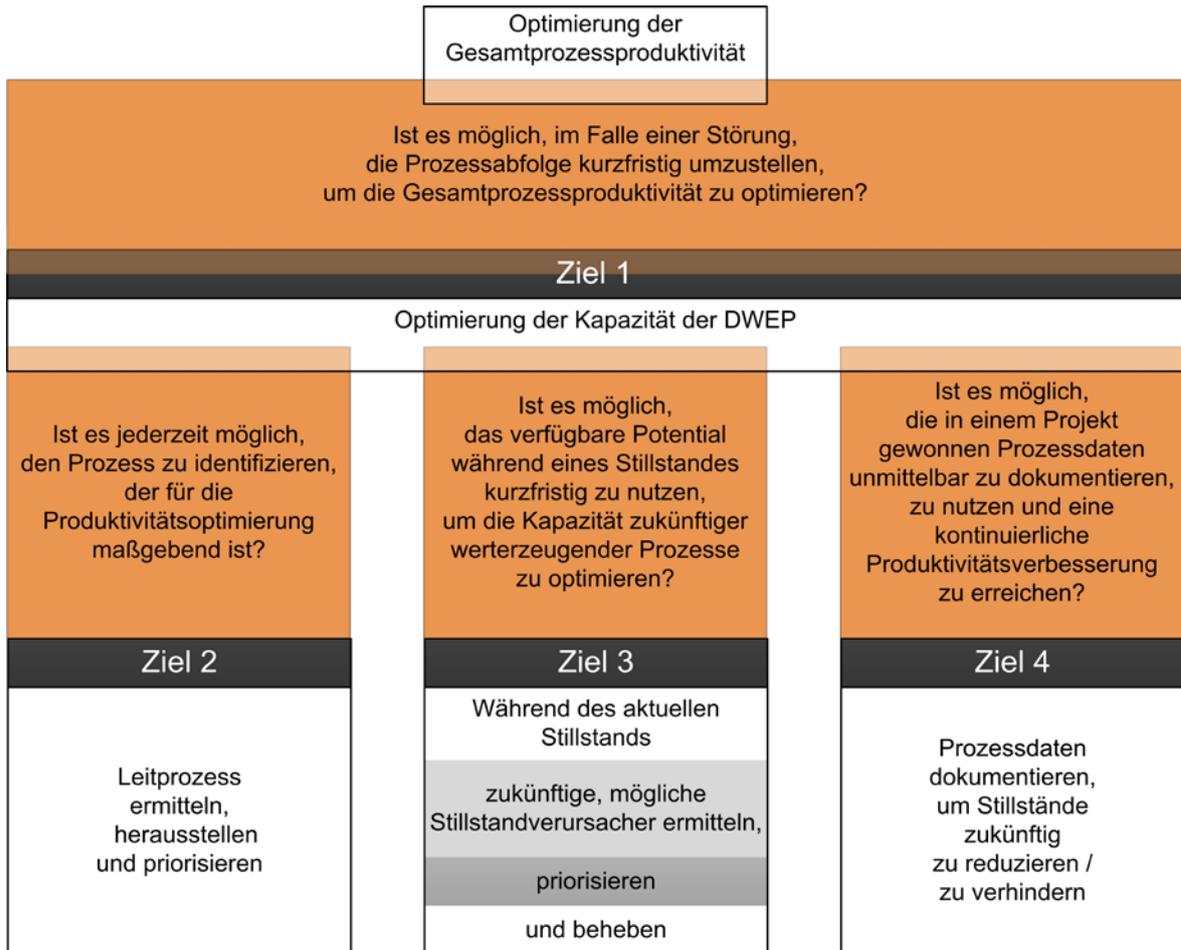


Abb. 20: Zusammenhang der Ziele des Prozessmodells und den Forschungsfragen

Die folgenden weiterführenden Forschungsfragen zur Erreichung der Ziele 3 und 4 werden im Kapitel 7 aufgestellt.

**Ist es möglich,
 das verfügbare Potential während eines Stillstandes
 kurzfristig zu nutzen,
 um die Kapazität zukünftiger werterzeugender Prozesse
 zu optimieren?**

**Ist es möglich, die in einem Projekt gewonnenen Prozessdaten
 unmittelbar zu dokumentieren, zu nutzen
 und eine kontinuierliche Produktivitätsverbesserung zu erreichen?**

Wert-Box 04: Einordnung in die Themenstellung und Wert für das Prozessmodell

Um mithilfe des Prozessmodells das Ziel eines produktiven Bauprozesses durch das systematische Suchen und Aufzeigen freier Potentiale zu erreichen, wurden drei möglichen Prozesskategorien definiert. Die **DWEP** (Direkt Werterzeugenden Prozesse) liegen i.d.R. auf dem Kritischen Weg und erzeugen einen **tatsächlichen Wert** für den Kunden. Sinkt die Kapazität eines DWEP, so sinkt auch die Gesamtprozesskapazität. Fällt ein DWEP dauerhaft aus, kommt es zum Erliegen des Gesamtprozesses. Alle Aktivitäten, die dafür sorgen, dass die DWEP gemäß ihrer möglichen Kapazität ausgeführt werden können, haben **Priorität**. Die **IWEP** (Indirekt Werterzeugenden Prozesse) senken die mögliche Gesamtkapazität, sobald sie die Ausführung eines DWEP auf dem Kritischen Weg verhindern. Dies kann aufgrund ihrer **Notwendigkeit unvermeidbar** sein. Ein IWEP erzeugt keinen direkten Wert, ist jedoch für die Werterzeugung nötig. Wird ein nicht notwendiger IWEP ausgeführt und verhindert die Ausführung eines DWEP oder eines notwendigen IWEP, so wird er begrifflich zu einer Störung und bedingt einen NWEP. Die **NWEP** (Nicht-Werterzeugenden Prozesse) sind unplanmäßige Stillstände, die die Ausführung eines geplanten Prozesses unterbrechen oder verhindern, da sie zur Behebung einer Störung notwendig sind. Ein NWEP **verhindert die Wertschöpfung** und ist, wie die Störung selbst, unter allen Umständen zu vermeiden. Werden die Informationen über die NWEP verwendet, um präventive Kontrollen / Überprüfungen durchzuführen, werden in diesem Fall die NWEP begrifflich zu IWEP.

Die Optimierung der Prozesse zur Steigerung der Produktivität lässt sich auf **drei Schritte** aufteilen, welche kontinuierlich zu wiederholen und den aktuellen Bedingungen und Informationen anzupassen sind. Im **ersten Schritt** werden die DWEP isoliert betrachtet und optimiert. Im **zweiten Schritt** werden auch die IWEP betrachtet. Für diese wird der erste Schritt durchgeführt, die Abhängigkeiten von DWEP und IWEP analysiert und die Abfolge sowie die Ressourceneinteilung optimiert. Im dritten Schritt werden auch die NWEP berücksichtigt. Dieser Schritt bedingt die Steuerung der Prozesse und ist das Hauptaugenmerk des entwickelten Prozessmodells.

Zu jedem Zeitpunkt im Gesamtprozess können Prozesse der unterschiedlichen Kategorien auftreten, weshalb der Begriff des **Leitprozesses (LP)** eingeführt wurde. Mit diesem ist zu jedem Zeitpunkt zu klären, welcher Prozess Priorität hat, damit der Gesamtprozess optimiert wird.

Ist die Ausführung eines DWEP möglich, so ist dieser der LP. Ist die Ausführung eines DWEP nicht möglich, ist der Prozess, welcher die Ausführung eines DWEP verhindert der LP. Dieser kann entweder ein notwendiger IWEP oder die Behebung einer Störung, also ein NWEP sein. Die Ausführung des LP hat stets die höchste Priorität.

Mit dem Prozessmodell sollen vier Teilziele erreicht werden, anhand derer sichergestellt wird, dass die DWEP gemäß ihrer maximal möglichen Kapazität ausführbar sind (**Ziel 1**), dass zu jedem Zeitpunkt der LP bekannt ist (**Ziel 2**), dass während eines Stillstandes, weitere, zukünftige, stillstandverursachende Prozesse ermittelt werden und diese, falls möglich, parallel in der Zeit des aktuellen Stillstands ausgeführt werden können (**Ziel 3**) und dass alle Prozessdaten ermittelt, analysiert, dokumentiert, zukünftig (umgehend) berücksichtigt und verwendet werden können (**Ziel 4**).

4 Grundlagen für die Prozessmodellentwicklung

In den vorangegangenen Kapiteln wurde dargestellt, was die Besonderheiten der Bauproduktion sind, welche Bauproduktionsfaktoren zu berücksichtigen sind, wie die Kapazität der Prozesse definiert ist, welche Prozesskategorien sich unterscheiden lassen und wie zu jedem Zeitpunkt der Leitprozess ermittelt werden kann. In diesem Kapitel werden nun die Grundlagen für die Entwicklung eines Prozessmodells untersucht. Hierbei wird im ersten Unterkapitel das Vorgehen zur Entwicklung dieses Prozessmodells dargestellt. Im zweiten Unterkapitel werden die allgemeinen Grundlagen zur Entwicklung eines Modells, im dritten die Anforderungen an das Prozessmodell und abschließend im vierten die Wahl einer Modellart zur Problemlösung beschrieben.

4.1 Vorgehen

Um die Entwicklung eines Prozessmodells zielführend zu gestalten, ist ein wissenschaftliches Vorgehen notwendig. Hierzu wird dem betriebswirtschaftlichen Problemlösungsansatz gefolgt. Die ersten beiden Schritte dieses Prozesses wurden bereits in den vorangehenden Kapiteln behandelt. Zu beachten ist, dass die fünf im Folgenden dargestellten Schritte kontinuierlich unter Berücksichtigung der neu gewonnenen Informationen und Daten zu wiederholen sind.

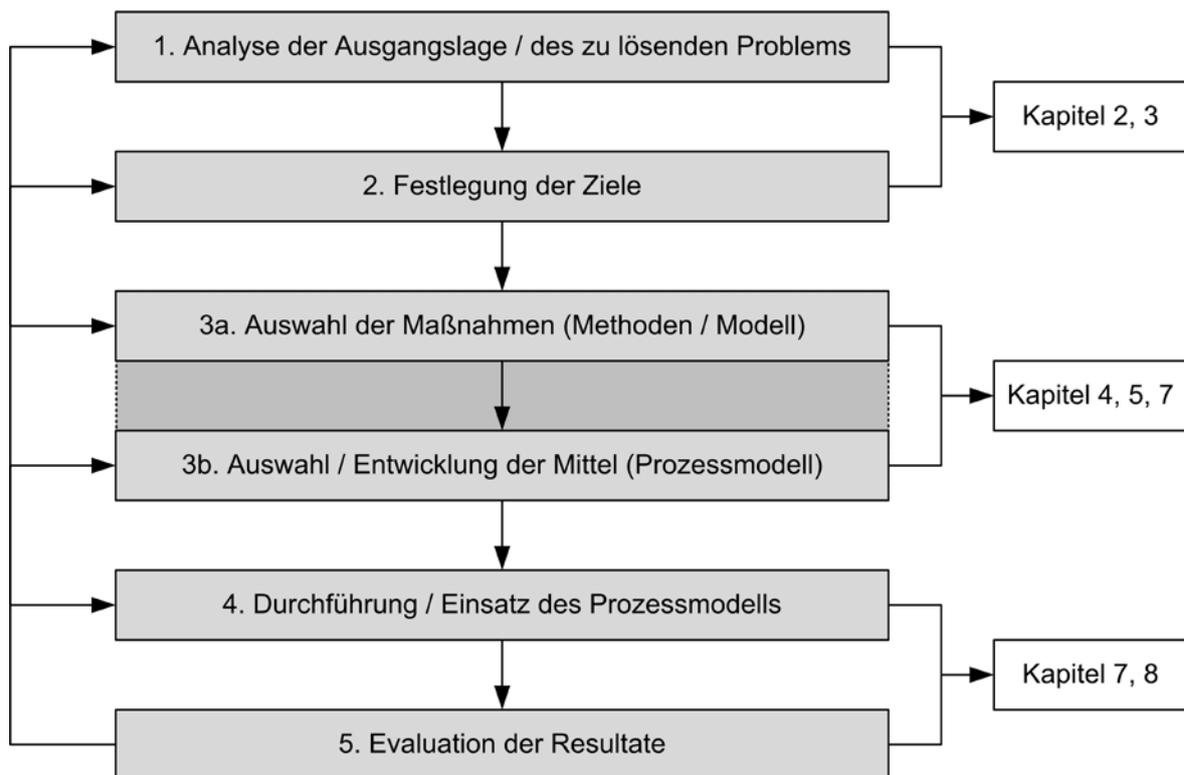


Abb. 21: Ablauf Problemlösungsprozess¹⁵⁶

¹⁵⁶ In Anlehnung an Thommen et al., 2017, S.10.

In einem **ersten Schritt** ist die **Ausgangslage zu analysieren**, was bereits im Kapitel 2 geschehen ist. Hierbei sind das zu lösende Problem, die Umstände und der Bereich in welchem das Problem auftritt sowie die Grundlageninformationen für die Problemlösung zu ermitteln.¹⁵⁷

Kann das Problem identifiziert und die Notwendigkeit der Problemlösung begründet werden, folgt als **zweiter Schritt** des Problemlösungsprozesses die **Festlegung des Ziels**, welche im Kapitel 3 durchgeführt wurde. Dieses besteht wie in diesem Fall i.d.R. nicht aus nur einem Ziel, sondern aus einem Bündel von sich untereinander beeinflussender Ziele, einem Zielsystem.¹⁵⁷ Die Ergebnisse der ersten beiden Schritte des Problemlösungsprozesses sind in Abb. 22 zusammengestellt.

Im **dritten Schritt** sind die **Maßnahmen** (Auswahl von Methoden, z.B. Modell) sowie die hierfür **notwendigen Mittel** (Auswahl Modellart und Entwicklung Prozessmodell) **festzulegen**, um die definierten Ziele zu erreichen, was zu einem großen Teil in diesem Kapitel (4.3, 4.4) und in den Kapiteln 5 und 7 geschehen wird.¹⁵⁷

Die **Umsetzung** der Maßnahmen durch die Anwendung der gewählten Mittel erfolgt im **vierten Schritt**, gefolgt von der **Evaluation** der Resultate im **fünften Schritt**. Diese beiden Schritte erfolgen in den Kapiteln 7 und 8.

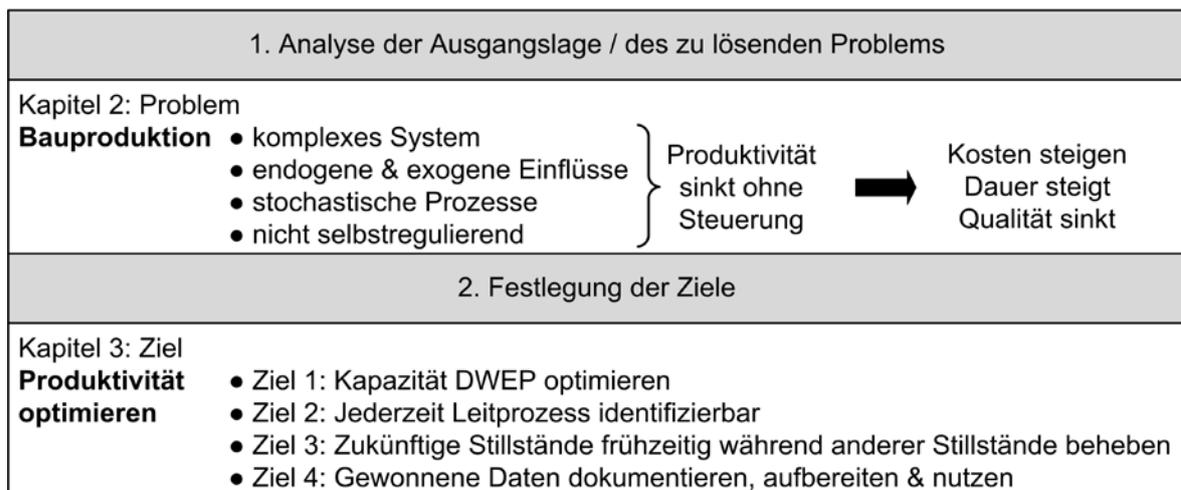


Abb. 22: Schritte 1 und 2 des Problemlösungsprozesses

¹⁵⁷ Vgl. Thommen et al., 2017, S.10.

4.2 Grundlagen Modell

Bei der Modellentwicklung ist das Wesentliche, dass mit einem Modell die Realität abgebildet werden soll. Das Modell stellt das vereinfachte Abbild eines realen Systems dar, wobei lediglich die Analogie bzgl. des Untersuchungsgegenstandes zwischen dem Original (reales Objekt, reales Problem, reales System) und dem Modell von Bedeutung ist. Die Funktionsweise des Modells sollte unabhängig von seiner Gestaltungs- bzw. Darstellungsform sein, nur die wichtigen Aspekte (entscheidungsrelevante Informationen) müssen erfasst sein.¹⁵⁸

Definition Modell (nach VDI-Richtlinie 3633)

„Vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System.“¹⁵⁹

Hauptmerkmale Modell

Die folgenden drei Hauptmerkmale des allgemeinen Modellbegriffs nach *Stachowiak*, sind bei der Modellerstellung zu berücksichtigen:

1. Abbildungsmerkmal:
„Modelle sind stets Modelle *von etwas*, nämlich Abbildungen, Repräsentationen natürlicher oder künstlicher Originale, die selbst wieder Modelle sein können.“¹⁶⁰
2. Verkürzungsmerkmal:
„Modelle erfassen im Allgemeinen *nicht alle* Attribute des durch sie repräsentierten Originals, sondern nur solche, die den jeweiligen Modellerschaffern und/oder Modellnutzer relevant sind.“¹⁶¹
3. Pragmatisches Merkmal:
„Modelle sind ihren Originalen nicht per se eindeutig zugeordnet. Sie erfüllen ihre Ersetzungsfunktion a) für *bestimmte* - erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende - *Subjekte*, b) innerhalb *bestimmter Zeitintervalle* und c) unter Einschränkung auf *bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen*.“¹⁶²

Für die Modellerstellung bedeutet die Berücksichtigung der drei Merkmale, dass das Modell die Eigenschaften, wie die Struktur und die Funktionsweise des Originals korrekt wieder spiegeln. Jedoch müssen nicht alle Eigenschaften des Originals vom Modell wiedergegeben werden, sondern es werden nur die für die Zielstellung wichtigen Eigenschaften berücksichtigt. Außerdem ist das Modell so zu entwickeln, dass es nutzbar ist. Die ausgewählten Eigenschaften sollen nicht nur richtig abgebildet werden, sondern auch in verständlicher Form eingebunden werden.

¹⁵⁸ Vgl. Daenzer, 1976, S.13.

¹⁵⁹ VDI, 2018, S.3.

¹⁶⁰ Stachowiak, 1973, S.131.

¹⁶¹ Ebenda, S.132.

¹⁶² Ebenda, S.132 f.

Modelltypen

Um die Prozesse (normaler Ablauf und Stillstand) der Bauproduktion (und im Speziellen im Rohrvortrieb) darzustellen, bieten sich zwei Typen von Modellen an. Zum einen das Entscheidungs- oder Optimierungsmodell. Dieses stellt das Abbild eines Entscheidungs- bzw. Planungsproblems dar und wird bei der Suche nach Empfehlung von optimalen bzw. suboptimalen Lösungen verwendet. Zum anderen das Simulationsmodell. Dieser Modelltyp wird verwendet, um Alternativen durchzuspielen und die Wirkungen dieser zu bestimmen.¹⁶³

Für die Prozessoptimierung im Falle einer erheblichen Prozessschwankung oder eines Stillstandes aufgrund einer außerplanmäßigen Situation soll ein Modell entwickelt werden, dessen Darstellungsform es erlaubt, alle möglichen Prozesse einer Bauproduktion (des Rohrvortriebs) zu berücksichtigen und abzubilden. Mit Hilfe des Modells soll eine fundierte Entscheidungsunterstützung zur Verfügung gestellt werden. Hierbei sollen Lösungen für auftretende Probleme gefunden werden, mit diesen Lösungen die aufgetretenen Störungen umgehend analog auf der Baustelle behoben werden und deren Folgen möglichst positiv gestaltet werden.

Insbesondere zeitliche Schwankungen lassen sich im Bauprozess, aufgrund der Besonderheiten der Branche, häufig nicht vermeiden und nur bedingt anhand von Pufferzeiten einplanen. Mit dem Prozessmodell wird versucht, die Art und Weise, wie besonders große Schwankungen und Störungen minimiert werden, wie diese betrachtet werden (ist eine Minimierung überhaupt notwendig?) und wie kurzzyklisch und langfristig aus den ungeplanten Situationen gelernt wird, zu verbessern.

Bekannte potentielle Schwankungen der geplanten Bauprozesse werden, wie bereits oben erwähnt, i.d.R. mit Hilfe von Puffern in der Ablaufplanung versucht zu berücksichtigen. Durch die Definition der Prozesse, auf welche besonderer Wert gelegt werden muss, kann in jeder Situation (bei jedem Teilprozess) entschieden werden, ob sich der Aufwand im Hinblick auf das gesamte Projekt („Das große Ganze“) lohnt. Dies bedeutet, dass jeder einzelne Prozess im ganzheitlichen Ansatz gesehen werden muss, um für ihn eine optimale Lösung zu finden und dem Nutzer eine Empfehlung für das weitere Vorgehen liefern zu können.

Das Prozessmodell stellt ein praktisch anwendbares Optimierungsmodell (siehe Kapitel 4.4) dar, welches als Hilfestellung dienen soll, um die außerplanmäßigen Situationen optimal zu berücksichtigen und zukünftig zu verringern.

Im Folgenden werden weitere Anforderungen, welche das Prozessmodell erfüllen muss und welche bei seiner Entwicklung umgesetzt wurden, dargestellt.

¹⁶³ Vgl. Domschke & Drexl, 2011, S.3.

4.3 Anforderungen an das Prozessmodell

Bei der Modellentwicklung wurden folgende Grundsätze konsequent umgesetzt:

- Ganzheitlichkeit
- Flexibilität
- Prozessorientierung
- Kundenorientierung
- Flussorientierung
- Einfachheit
- Transparenz

Ganzheitlichkeit

Den Ausgangspunkt einer ganzheitlichen Betrachtungsweise des Prozessmodells bilden der Systemgedanke und die Erkenntnis, dass für die Erklärung des Ganzen die Erklärung der einzelnen Teile nicht ausreichend ist. Im ganzheitlichen Denken sind die komplexen, vernetzten Zusammenhänge der einzelnen Teile und die Erklärung ihrer Beziehungen untereinander wichtiger.¹⁶⁴ Für eine ganzheitliche Betrachtung muss das Prozessmodell alle in der Vergangenheit aufgetretenen Störprozesse (NWEPE), die wertschöpfenden Prozesse (DWEPE) und die indirekt-wertschöpfenden Prozesse (IWEPE) vollumfänglich mitsamt ihren gegenseitigen Abhängigkeiten erfassen, nachvollziehbar und transparent darstellen.

Flexibilität

Das Modell soll so gestaltet sein, dass es in Bezug auf das Gebiet seiner praktischen Anwendung flexibel, anpassbar, erweiterbar und optimierbar ist. Die Modellstruktur soll für unterschiedliche (Vortriebs-)Verfahren allgemeingültig sein und die Modellierung soll für die verschiedenen Anwendungsgebiete mit den sich ändernden Eingangsgrößen und bei Änderung der Randbedingungen mit geringem Aufwand anpassbar sein. Ebenso soll es möglich sein, das System so zu erweitern, dass die Unsicherheiten in den Prozessen (Schwankungen) berücksichtigt und flexibel angepasst werden können.

Prozessorientierung

Der Fokus des Prozessmodells liegt auf der optimierten Anordnung der Prozesse. Die Anzahl, Häufigkeit und Dauer von IWEPE und NWEPE sind zu minimieren und diese nach Möglichkeit gänzlich zu eliminieren, damit die DWEPE ausgeführt und optimal miteinander verknüpft werden können. Die Standardisierung von Prozessen stellt ein wirkungsvolles Mittel zur Wertsteigerung dar. Mit dem Prozessmodell soll zudem eine Standardisierung der Abläufe zur Verfügung gestellt werden, falls kein DWEPE ausgeführt werden kann bzw. diese oder notwendige IWEPE in ihrer Ausführungsdauer erheblich schwanken. Die Zeit, in welcher ein IWEPE oder ein NWEPE notwendig ist, sollte mit Hilfe des Prozessmodells (standardisiert) optimal ausgenutzt werden, damit die DWEPE oder notwendige, nicht parallel ausführbare IWEPE anschließend optimal (gemäß ihrer Kapazität) ausgeführt werden können.

¹⁶⁴ Vgl. Pfohl, 2018, S.28.

Kundenorientierung

Die Kombination aus der Forderung nach der Ganzheitlichkeit und der Prozessorientierung ergibt die Ausrichtung des Prozessmodells auf den Kunden. Hierbei ist, wie in Kapitel 5.5.1 dargestellt wird, bei der Begrifflichkeit zwischen den internen (Prozess-)Kunden und dem Endkunden zu unterscheiden. Jedoch ergibt sich aus dem Ziel, die Endkundenziele in terminlicher, qualitativer und monetärer Hinsicht optimal zu erfüllen, das Ziel der Optimierung der ganzheitlichen Ablaufprozesse. Dieses strebt wiederum die optimale Erfüllung der Ziele der internen Prozesskunden an. Das Ziel des Endkunden kann nur über die Befriedigung der Prozesskunden erreicht werden. Das Prozessmodell soll für den jeweiligen Anwender anpassbar sein, damit dieser bei seiner Entscheidungsfindung bestmöglich unterstützt wird.

Flussorientierung

Um die Ziele Kundenzufriedenheit und Optimierung der Ablaufprozesse erreichen zu können, ist das Prozessmodell so zu gestalten, dass der Ablauf der Prozesse stetig gleichmäßiger wird, indem alle Aktivitäten an den wertschöpfenden Prozessen ausgerichtet werden. Durch das Prozessmodell sollen diese in einen gleichmäßigen Fluss gebracht werden.

Einfachheit

Um standardisiert und unabhängig vom Nutzer für verschiedene Projekte anwendbar zu sein, soll die Verwendung des Modells einfach, effizient und intuitiv möglich sein. Die Anpassung an die jeweilige Aufgabenstellung (Randbedingungen Projekt, Vortriebsverfahren, Störprozesse) soll so mühelos und schnell wie möglich durchführbar sein.

Transparenz

Eine modellgerechte Darstellung der Prozesse soll eine Transparenz der Methodik gewährleisten. Dies gilt sowohl für die originären Eingangsparameter und Abhängigkeiten der Prozesse untereinander als auch für den Ablauf des Prozessmodelles zur Prozessauswahl. Die Transparenz des Modells soll zum Verständnis für die Auswahl der sinnvollsten Lösung beitragen. Hierfür sind die Bedingungen (Filter und Kriterien, siehe Kapitel 7.7) für dieses Prozessmodell darzustellen bzw. ihre jeweilige Auswahl zu begründen.

4.4 Optimierungsmodell

Ein Optimierungsmodell (auch Entscheidungsmodell) ist das Abbild eines Entscheidungsproblems. Es stellt ein aus drei Teilen bestehendes System dar, mit welchen Lösungen (Entscheidungsunterstützung) für das Realproblem ermittelt werden sollen. Der erste Teil stellt eine Auswahl von Entscheidungs- und Zusatzvariablen dar, welche einen vorgegebenen Definitionsbereich besitzen. Der zweite Teil ist eine Reihe von Bedingungen, welche den Variablen gerecht werden müssen. Der dritte Teil stellt mindestens eine Zielfunktion dieser Variablen dar. Dies können beispielsweise maximale oder minimale Werte sein, welche anschließend nach definierten Präferenzen geordnet werden können. Mithilfe des Modells können mögliche, zukünftige Verlaufsformen eines Realsystems als Handlungsfolgen tatsächlich getroffener Entscheidungen ermittelt werden.¹⁶⁵

In den folgenden Abschnitten werden die Formulierung eines allgemeinen Optimierungsmodells und ein Beispiel mit Bezug auf den Rohvortrieb dargestellt.

4.4.1 Formulierung eines allgemeinen Optimierungsmodells

Formulierung eines allgemeinen Optimierungsmodells:¹⁶⁶

$$\text{Maximiere (oder Minimiere)} \quad F(x) \quad (4.1)$$

$$\text{Unter den Nebenbedingungen} \quad (4.2)$$

$$g_i(x) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} 0 \text{ für } i = 1, \dots, m \quad (4.3)$$

$$x \in W_1 * W_2 * \dots * W_n, \quad W_j \in \{\mathbb{R}_+, \mathbb{Z}_+, B\}, j = 1, \dots, n$$

Formel 4: Allgemeines Optimierungsmodell (3 Formeln)

Dabei haben die verwendeten Symbole folgende Bedeutung:

x	ein Vektoren mit n Komponenten x_1, \dots, x_n
$F(x)$	eine Zielfunktion
$g_i(x)$	Nebenbedingung in Abhängigkeit von x
W_i	Legt den Wertebereich der Entscheidungsvariable fest
$x_j \in \mathbb{R}_+$	Nichtnegativitätsbedingung (kontinuierliche Variable)
$x_j \in \mathbb{Z}_+$	Ganzzahligkeitsbedingung (ganzzahlige Variable)
$x_j \in B$	Binärbedingung (binäre Variable)

¹⁶⁵ Vgl. Stachowiak, 1973, S.270.

¹⁶⁶ Domschke & Drexl, 2011, S.4.

Erläuterung der einzelnen Formeln:¹⁶⁷

- (4.1) Entspricht der Zielfunktion, die maximiert oder minimiert werden soll.
Maximierende Größen: Absatz, Umsatz, Nutzen
Minimierende Größen: Distanz, Dauer, Kosten
- (4.2) Ist ein System von m Gleichungen und/oder Ungleichungen.
- (4.3) Legt den Wertebereich der Entscheidungsvariablen fest. Jede Variable hat einen kontinuierlichen, ganzzahligen oder binären Wertebereich.

4.4.2 Beispiel für ein Optimierungsproblem im Rohrvortrieb¹⁶⁸

Das Prozessmodell soll ein praktisch anwendbares Optimierungsmodell darstellen, dessen Ziel es ist anhand bestimmter Vorgaben herauszufinden welcher Prozess in der jeweiligen Situation die optimale Lösung für eine bestimmte Zielvorgabe darstellt. Das Vorgehen dabei soll am folgenden Beispiel dargestellt werden. Für den Rohrvortrieb können verschiedene Prozesse mit unterschiedlichen Fälligkeiten und unterschiedlichen Prozessdauern ausgewählt werden, wie in den Kapiteln 7 und 8 erläutert wird. Hierbei soll eine möglichst sinnvolle (höhere Fälligkeiten sollten früher beachtet werden) und große Menge an Prozessen gewählt werden, die in einer vorgegebenen maximalen Zeit zu erbringen sind.

Allgemein stehen n Prozesse ($j = 1, \dots, n$) mit den Fälligkeiten c_j und den Dauern w_j zur Auswahl. Die maximale Dauer der auszuführenden Prozesse sei b . Für den Prozess j wird die Binärvariable x_j (= 1, falls der Prozess ausgeführt wird, und 0 sonst) verwendet.

Das Modell lässt sich mathematisch folgendermaßen formulieren:

Maximiere (5.1)

$$F(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Unter den Nebenbedingungen

(5.2)

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j \leq b$$

(5.3)

$$x_j \in \{0,1\} \quad \text{für } j = 1, \dots, n$$

Formel 5: Beispiel für Optimierungsproblem im Rohrvortrieb

Dabei haben die verwendeten Symbole folgende Bedeutung:

x	Variablenvektor der n Prozesse x_1, \dots, x_n
$F(x)$	Zielfunktion
c_j	Fälligkeit
w_j	Prozessdauer
b	maximale Prozessdauer
$x_j \in \mathbb{R}_+$	Nichtnegativitätsbedingung (kontinuierliche Variable)
$x_j \in \mathcal{B}$	Binärbedingung (binäre Variable)

¹⁶⁷ Domschke & Drexl, 2011, S.4 - entsprechend gekürzt.

¹⁶⁸ In Anlehnung an das „Knapsack-Problem“ aus Domschke & Drexl, 2011, S.6.

Erläuterung der einzelnen Formeln:

- (5.1) Zielfunktion, die maximiert werden soll.
Maximierende Größe: Produkt aus Fälligkeit und Dauer
- (5.2) Nebenbedingung die durch eine Ungleichung zu geringe Prozessdauern ausschließt.
- (5.3) Legt den Wertbereich der Entscheidungsvariablen fest.

Als Bedingung (später als Kriterium bezeichnet) wird die Dauer w der Prozesse gestellt, die nicht größer als die maximale Dauer b sein darf. Alle Prozesse die diese Bedingung erfüllen (= Nebenbedingung Formel 5.2), lassen sich anschließend der Größe (Fälligkeit c) nach bewerten und ggf. weiterverwenden. Es wird hierbei also mit der Funktion F (Formel 5.1) das maximale Produkt aus den Fälligkeiten und den Dauern der einzelnen (möglichen 5.1) Prozesse ermittelt. In den späteren Kapiteln 7 und 8 stellt die Formel 5.2 hierbei ein Kriterium dar, die Formel 5.1 dann einen Filter zur Ranglistenbildung.

Wert-Box 05: Einordnung in die Themenstellung und Wert für das Prozessmodell

Bei der Prozessmodellentwicklung sind die folgenden Anforderungen zu erfüllen:

Ganzheitlichkeit

Für eine ganzheitliche Betrachtung sind im Prozessmodell alle Prozesse (DWEP, IWEP und NWEPE) vollumfänglich mitsamt ihren gegenseitigen Abhängigkeiten zu erfassen und nachvollziehbar sowie transparent darzustellen.

Flexibilität

Das Prozessmodell soll flexibel, anpassbar, erweiterbar und optimierbar gestaltet sein, um für verschiedenen Anwendungsgebiete, Eingangsgrößen und Randbedingungen nutzbar zu sein.

Prozessorientierung

Mit dem Prozessmodell soll die Kapazität der DWEP optimiert werden, indem die Prozessanordnung optimiert und die Anzahl, Häufigkeit sowie Dauer der IWEP und NWEPE minimiert wird. Hierfür sind die Prozesse und die Abläufe zu standardisieren.

Kundenorientierung

Mit dem Prozessmodell sollen die Ansprüche der internen (Prozess-)Kunden und des Endkunden erfüllt werden. Das Ziel des Endkunden kann nur über die Befriedigung der Prozesskunden erreicht werden.

Flussorientierung

Das Prozessmodell ist so zu gestalten, dass der Ablauf der Prozesse stetig gleichmäßiger wird, indem alle Aktivitäten an den wertschöpfenden Prozessen ausgerichtet werden und ein gleichmäßiger Fluss entsteht.

Einfachheit

Die Verwendung des Prozessmodells soll einfach, effizient und intuitiv möglich sein.

Transparenz

Das Prozessmodell, die hinterlegten Daten und die Abläufe sollen transparent gestaltet sein, und so zum Verständnis für die Auswahl der sinnvollsten Lösung beitragen.

Prozessmodell als Optimierungsmodell

Das Prozessmodell stellt ein Optimierungsmodell (Entscheidungsmodell) dar. Dies ist ein System, mit welchen Lösungen (Entscheidungsunterstützung) für ein Realproblem ermittelt werden sollen. Mithilfe eines Optimierungsmodells können mögliche, zukünftige Verlaufsformen eines Realsystems als Handlungsfolgen tatsächlich getroffener Entscheidungen ermittelt werden.

Das Prozessmodell stellt ein deutlich praktischer aufgebautes Optimierungsmodell dar. Die Eingangsparameter sind sehr umfangreich und die Rechenprozesse würden den praktischen Nutzen des Prozessmodells übersteigen. Deshalb wird das Prozessmodell so angelegt, dass nur die für eine spezifische Situation notwendigen Daten abgefragt werden.

5 Lean Methoden als Werkzeuge zur Produktivitätssteigerung

5.1 Der Weg von Toyota über Lean Thinking zu Lean Construction

Der Begriff „lean“, dessen Ursprünge auf das Toyota Production System zurückgehen, wird heute verwendet um darzustellen, dass Tätigkeitsfelder wie beispielsweise Management, Planung, Produktion oder Konstruktion im Vergleich zu traditionellen Verfahren verbessert ausgeführt werden. Diese Verbesserung kann mit der einfachen Übersetzung von „lean“, also „schlank“ oder freier mit „effizient“ beschrieben werden. „Schlank“ oder „effizient“ bedeutet hier, dass mit möglichst geringem Input ein möglichst großer Output erreicht werden soll. Der Begriff „lean“ stammt allerdings nicht von Toyota, sondern geht auf eine im Jahr 1990 am Massachusetts Institute of Technology (MIT) veröffentlichte Studie von *Womack et. al.* zurück, welche sie später mit dem Titel „*Die zweite Revolution in der Automobilindustrie*“ veröffentlichten.¹⁶⁹ Die Ansätze dieser Arbeit wird im Abs. 5.3 dargestellt.

Taiichi Ohno war Produktionsleiter und Führungskraft bei Toyota, entwickelte das **Toyota-Produktionssystem (TPS)** systematisch weiter und veröffentlichte die Methoden in seinen Büchern.¹⁷⁰ Die Konzepte des TPS sind einer der Gründe, warum Toyota auch heute noch einer der größten Automobilhersteller der Welt ist. Die Methoden des TPS werden im Abs. 5.2 erläutert.

Einen wichtigen Beitrag zur Produktionsoptimierung hat *Goldratt* mit seiner „**Theory of Constraints**“¹⁷¹ (TOC, Engpasstheorie) geleistet. Diese Theorie stellt Methoden und The- sen bzgl. des Managements von Engpässen in der Produktion und der Optimierung von Ablaufprozessen dar. Im Abs. 5.4 wird gezeigt, dass eine Übertragung der TOC-Ansätze auf das Bauwesen und insbesondere die Anwendung dieser im Tunnelvortrieb aufgrund der kurzzyklischen Wiederholung der Prozesse sinnvoll ist.

Im Abs. 5.5 werden der Ist-Zustand und die Entwicklung von Lean Construction (LC) näher betrachtet und im Abs. 5.6 die ersten Anwendungen von LC im Tunnelvortrieb dargestellt.

¹⁶⁹ Womack et. al., 1991.

¹⁷⁰ Seine erste Veröffentlichung erschien 1978, jedoch nur auf Japanisch. 1988 erschien die ins Eng- lische übersetzte Fassung mit dem Titel: *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Pro- duction*. 1993 erschien auf Deutsch: *Das Toyota-Produktionssystem – Der Begründer der Lean Production zeigt, wie sie entstand und wo sie in Reinkultur betrieben wird*.

¹⁷¹ Goldratt, 1984, Die Originalausgabe erschien unter dem Titel „The Goal - Excellence in Manufac- turing“.

5.2 Das Toyota-Produktionssystem

Die Verbindung aus der Ressourcenknappheit in Japan in der Zeit nach dem zweiten Weltkrieg und dem Willen von Toyota, mit der amerikanischen Automobilkonkurrenz mithalten bzw. diese übertreffen zu können, war der Ursprung des Toyota Produktionssystem (TPS). Hieraus entstand der primäre Leitgedanke des TPS - die Forderung nach der Vermeidung von Verschwendung - womit das Ziel der größtmöglichen Produktivität erreicht werden sollte.¹⁷² Das TPS stellt keine bloße Handlungsanweisung für die Optimierung von Unternehmensprozessen dar. Vielmehr ist es ein System aus einer Vielzahl an Methoden und die Konzentration auf die Werterzeugung des Gesamtprozesses.

5.2.1 Aufbau und Methoden

Das oberste Ziel des Toyota Produktionssystems (TPS) ist die **Maximierung der Produktivität**. Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Forderung nach der **völligen Beseitigung von Verschwendung** zu erfüllen. Dieser wird Toyota durch zwei Säulen gerecht, auf welchen das TPS fundiert. Die erste Säule ist das **Just-in-Time-Prinzip** (JIT) und die zweite die **Autonome Automation**.¹⁷³ Mit Hilfe von JIT wird erreicht, dass die zur Montage benötigten richtigen Teile zur richtigen Zeit und in der richtigen Menge am benötigten Ort ankommen, wodurch der Lagerbestand und somit die Kapitalbindung reduziert werden.¹⁷⁴ Die Autonome Automation (jap. *Jidōka*) stellt ein Prüfsystem dar, welches „automatisch reagiert, wenn Probleme auftreten.“¹⁷⁵

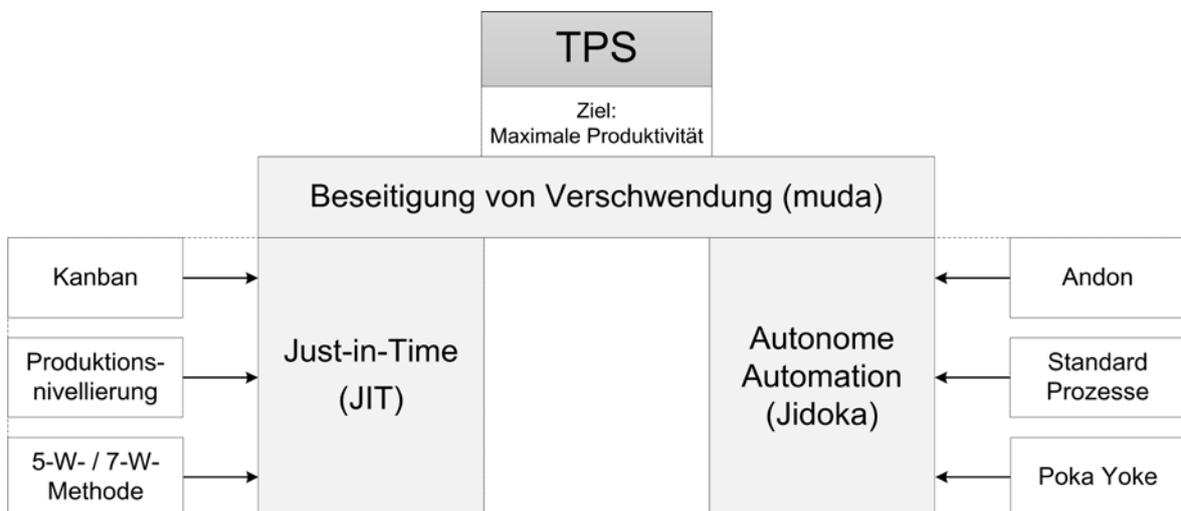


Abb. 23: Das Toyota Produktionssystem mit ausgewählten Hilfsmitteln¹⁷⁶

¹⁷² Vgl. Ohno, 1993, S.7 ff.

¹⁷³ Vgl. Ohno, 1993, S.30.

¹⁷⁴ Vgl. ebenda, S.31.

¹⁷⁵ Ebenda, S.17.

¹⁷⁶ Eigene Darstellung.

5.2.2 Verschwendung - *Muda*

Nach *Ohno* stellen nur notwendige Arbeiten tatsächlich Arbeit dar. Der Rest wird als Verschwendung (jpn.: *Muda*) bezeichnet. Die Verbesserung der Effizienz kann somit nur erreicht werden, wenn es keine Verschwendung mehr gibt.¹⁷⁷

Es werden zwei Typen von Verschwendung unterschieden:¹⁷⁸

1. **Muda Typ I – „Sehenleistung“**

Es wird kein Wert erzeugt, aber unter gegenwertigen Technologien und Fertigungseinrichtungen unvermeidbar.

2. **Muda Typ II – „Blindleistung“**

Es wird kein Wert erzeugt und ist direkt vermeidbar.

In der Literatur werden die folgenden sieben klassischen Verschwendungsarten aufgezählt:¹⁷⁹

1. **Verschwendung durch Überproduktion**

Es wird mehr produziert, als für die derzeitige Nachfrage notwendig ist. Es handelt sich um Produktion, welche vom Kunden nicht gewollt ist.

2. **Verschwendung durch Wartezeiten**

Es handelt sich um Zeit, die Arbeit in einem inaktiven Status zwischen Prozessen verbringt.

3. **Verschwendung beim Transport**

Es handelt sich um eine Quelle für Verzögerungen, Kosten und Risiko durch möglichen Verlust oder Schäden beim Transport zwischen Prozessen.

4. **Verschwendung bei der Bearbeitung**

Es wird mehr Arbeit geleistet, als laut Spezifikation für die Wertsteigerung des Endprodukts nötig ist.

5. **Verschwendung durch Lagerhaltung**

Es handelt sich um Lagerbestände (oder Work in Progress), welche Kapital binden, Flächen belegen oder bei zu langer Lagerung nicht mehr verwendet werden können.

6. **Verschwendung durch überflüssige Bewegung**

Es handelt sich um alle Bewegungsarten im Produktionsprozess neben dem Transport von Gütern, welche Schaden für Menschen und Gerät verursachen.

7. **Verschwendung durch defekte Produkte**

Effektive Kapazität wird verschwendet, um minderwertige Arbeit und defekte Teile auf den erforderlichen Standard zu bringen oder direkt zu entsorgen.

¹⁷⁷ Vgl. *Ohno*, 1993, S.45.

¹⁷⁸ Vgl. *Womack & Jones*, 2013, S.29.

¹⁷⁹ In Anlehnung an *Ohno*, 1993, S.46; *Burrows*, 2015, S.123 f.; *Womack & Jones*, 2013, S.46. *Womack* und *Jones* bezeichnen alle menschlichen Aktivitäten, welche Ressourcen verbrauchen aber keinen Wert erzeugen, als Verschwendung. Vgl. *Womack & Jones*, 2013, S.23.

Zusätzlich werden weitere Verschwendungsarten, insbesondere mit Bezug auf das ausführende Personal, genannt:¹⁸⁰

8. Verschwendung durch schlechte Ergonomie

9. Verschwendung durch schlecht oder nicht genutztes Talent

Ohno stellt zwei Leitkriterien bei der vollständigen Beseitigung der Verschwendung dar:¹⁸¹

1. Eine Effizienzverbesserung ist nur sinnvoll, wenn diese mit einer **Kostensenkung** verbunden ist. Um dies zu erreichen, dürfen nur die Dinge hergestellt werden, die tatsächlich benötigt werden.
2. In einem ersten Schritt ist die Effizienz jedes Arbeiters und jedes Fließbandes, in einem zweiten sind die Arbeiter im Team und in einem dritten die Effizienz des gesamten Werkes zu untersuchen. Die Effizienz muss **auf jeder Ebene** und gleichzeitig für das Werk als Ganzes (**übergeordnete System**) verbessert werden.

¹⁸⁰ leanmagazin.de, 2018.

¹⁸¹ Vgl. Ohno, 1993, S.44 f.

Wert-Box 06: Beispiele für die Verschwendungsarten in der Baubranche

1. Verschwendung durch Überproduktion oder durch zu frühe Fertigstellung:
Wird der Tunnelvortrieb fortgesetzt und weiterhin Material ausgebracht, obwohl die Abraumdeponie ausgelastet ist, wird durch den somit notwendigen erhöhten Einsatz von Abfuhrfahrzeugen Verschwendung generiert.
2. Verschwendung durch Wartezeiten:
Der Rohrvortrieb kann nicht fortgesetzt werden, da die als nächstes einzubauenden Rohre nicht bestückt sind.
3. Verschwendung beim Transport:
Kann in den meisten Fällen als eine notwendige Verschwendung angesehen werden, da der Lagerplatz nicht dem Einbauort entspricht. Dies gilt allerdings nur, soweit der Transport auf einem Minimum gehalten wird. Jegliches erneutes Umsetzen von Beständen aufgrund schlechter Planung (bspw. der Logistikfläche) wird als Verschwendung angesehen. Beispielsweise kann ein Umsetzen von angelieferten Rohren, welche im Fahrweg der für den Abraum zuständigen LKWs stehen, zur Bindung des Krans und somit zur Verzögerung des Rohrvortriebes führen.
4. Verschwendung bei der Bearbeitung:
Durch das Herstellen einer hohen Wandoberflächengüte, obwohl weitere Wandaufbauten hinzugefügt werden.
5. Verschwendung durch Lagerhaltung:
Diese Verschwendungsart ist wohl als die offensichtlichste und häufigste auf Baustellen anzusehen und kann eine Vielzahl von Ursachen haben. Durch hohe Rohmaterialbestände (z.B. Bewehrungsstahl) wird versucht, die Unzuverlässigkeit von Lieferungen abzufangen. Durch den fehlenden Fluss in der Fertigung und durch Verzögerungen entstehen Zwischenbestände.
6. Verschwendung durch überflüssige Bewegung:
Diese Verschwendung tritt im großen wie im kleinen Maßstab auf. Im großen Maßstab muss ein Arbeiter z.B. beim Bestücken eines Rohres weite Strecken zum Lager der einzubauenden Materialien zurücklegen. Im kleinen Maßstab muss er Kleinteile wie Schrauben oder Werkzeug für die unterschiedlichen Arbeitsschritte umständlich (schlechte Ergonomie) aufheben.
7. Verschwendung durch defekte Produkte oder defekte Ressourcen:
Beim Rohrvortrieb führt ein Riss in einem eingebauten Rohr zu erheblichen Nachbearbeitungsaufwand. Das Ausmaß der Kontrolle von Zwischenprodukten ist im Hinblick auf die Konsequenzen eines beschädigten Zwischenprodukts anzupassen. Aufgrund der Auswirkungen und der Häufigkeit dieser Verschwendungsart im Baugewerbe sollten die Gründe für fehlerhafte Produkte, den Ausfall von Maschinen und die Verzögerung von Prozessen eingehend untersucht werden.

Mit Blick auf die in Kapitel 3.1 beschriebenen Prozesskategorien sind die IWEP zum *Muda Typ I* zu zählen, da sie nur indirekt einen Wert erzeugen. Die NWEP zur Behebung von Störungen zählen zum *Muda Typ II*. Das zweite Leitkriterium zur Verschwendungsvermeidung wird durch die drei Schritte der Optimierung wiedergespiegelt. So sind die Einzelprozesse, wie auch ihre Abhängigkeiten mit Blick auf den Gesamtprozess zu optimieren.

5.2.3 Just-in-time

Ein Produktionsprozess stellt einen Materialtransfer dar, bei welchem das Material von einer vorgelagerten Arbeitsstation an die nächste, nachgelagerte Arbeitsstation weitergegeben wird. *Ohno* drehte diesen Prozess um, damit die nachgelagerte Arbeitsstation die benötigte Menge von der vorgelagerten Arbeitsstation entnimmt. Die vorgelagerte Arbeitsstation stellt nur die Menge des entnommenen Materials erneut her (oder besorgt sie).

Just-in-time (JIT) bedeutet mehr, als nur „genau zur richtigen Zeit“. Nach *Ohno* beinhaltet das JIT-Prinzip die Lieferung der richtigen Teile, die zur Montage benötigt werden, zur rechten Zeit und nur in der benötigten Menge in einem Fließverfahren.¹⁸²

Mit diesem Prinzip sollen verschiedene Formen der Verschwendung vermieden werden. Durch die Lieferung der „richtigen Teile“ wird die Verschwendung beim Transport verhindert, da nur die benötigten Teile transportiert werden. Wird zur „richtigen Zeit“ geliefert, fällt (bei korrekter Planung) die Verschwendung von Wartezeiten weg. Außerdem kann hierdurch und durch die sofortige Verwendung (z.B. Einbau oder Einsatz) der Lagerbestand (Verschwendung durch Lagerhaltung) minimiert werden. Werden lediglich die benötigten (für die Bedienung der Nachfrage) Mengen geliefert, kann es zu keiner Überproduktion (Verschwendung durch Überproduktion) kommen.

Definition Just-in-time

„Richtiges Produkt, am richtigen Ort, zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Menge.“¹⁸³

Da mit der Anzahl der Arbeitsgänge innerhalb einer Produktion i.d.R. auch die Anzahl an Abhängigkeiten ansteigt, ist davon auszugehen, dass die Komplexität des Gesamtsystems zunimmt, wodurch der Schwierigkeitsgrad der systematischen Anwendung von JIT bei der Produktionsplanung aller Arbeitsgänge erhöht wird. JIT setzt somit eine genaue Planung voraus. Falsche Prognosen, fehlerhafte Unterlagen, mangelhafte (Teil-) Produkte, Maschinen- oder Personalausfälle sind weitere Risiken, welche bei einer JIT-Produktion zu erheblichen Problemen führen können. Werden diese Risiken nicht beachtet oder nur Einzelprozessoptima betrachtet, kann es zur Herstellung mangelhafter Produkte, deren Fehler erst bei einem späteren Arbeitsgang auffällt, oder zu Überproduktionen und der Erhöhung des Lagerbestandes kommen.¹⁸⁴

Der primäre Nutzen von JIT stellt somit die systematische Reduzierung der Störungen und Störeffekte in der Lieferkette bzw. im Produktionsfluss dar, um Verschwendungen zu vermeiden.¹⁸⁵

Um eine störungsfreie Lieferkette zu erreichen, wurden verschiedene Hilfsmittel und unterstützende Vorgehen entwickelt, welche sich zudem gegenseitig unterstützen. Vier der wichtigsten Hilfsmittel, deren Anwendung auch im Bauwesen denkbar ist und welche teilweise im in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodell in angepasster Form berücksichtigt werden, sind „Kanban“, die „Produktionsnivellierung“, die „5-W-Methode“ und die „7-W-Methode“. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

¹⁸² Vgl. Ohno, 1993, S.30 ff., S.52 f.

¹⁸³ Nach ebenda, S.52 f.

¹⁸⁴ Vgl. ebenda, S.30.

¹⁸⁵ Vgl. Dickmann, 2015, S.18.

Kanban

Die Anzahl der notwendigen Prozesse in einer Produktion ist i.d.R. nicht reduzierbar. Die Komplexität des Gesamtsystems darf jedoch keine Auswirkung auf die Einzelprozesse bzw. einzelne Prozessketten haben. Dies wird mit einem Informationssystem erreicht, welches „auf einen Blick“ jegliche notwendigen Informationen zu einem Prozess bzw. einem Produkt liefert. Dieses „Kernstück des TPS“¹⁸⁶ wird als „Kanban“ (jpn. für „Karte“, „Tafel“) bezeichnet. Ein Kanban enthält drei Basisinformationen, anhand welcher die Produktionsmenge, der Produktionszeitpunkt, das Produktionsverfahren, die Produktionsreihenfolge, die Transportmenge, der Transportzeitpunkt, der Bestimmungsort, der Lagerplatz, das Transportmittel etc. ersichtlich sind. Diese Basisinformationen sind:¹⁸⁷

1. Entnahmeeinformationen
2. Transportinformationen
3. Produktionsinformationen

Mit der Hilfe eines Kanbans¹⁸⁸ ist das umgehende Erkennen von Verschwendungen, wie beispielsweise zu große Lagerbestände oder die Herstellung fehlerhafter Produkte, möglich und der zu erbringende Kontroll- und Steuerungsaufwand wird auf ein Minimum reduziert.¹⁸⁹

Produktionsnivellierung (jap.: *Heijunka*)

Jeder Stau innerhalb der Produktion bedeutet eine Minderung der Produktivität und Verschwendung. Eine kontinuierliche Fertigung einzurichten und eine konstante Rohstofflieferung von außen aufrechtzuerhalten waren dabei die ersten, zu erbringenden Bedingungen des TPS.¹⁹⁰ Auf diesem Weg wurde die „Taktzeit“¹⁹¹ (auch „Arbeitstakt“ oder kurz der „Takt“) eingeführt. Da *Ohno* nicht ausdrücklich den Begriff Takt verwendet, wird eine genaue Definition und ausführliche Erläuterung im Kapitel 5.3.4 gegeben.

Ohno erkannte die problematischen Tatsachen, dass Zeiten für die Erbringung verschiedener Arbeiten unterschiedlich lang sein können, da Arbeiter unterschiedlich schnell Arbeiten erledigen können, unvorhersehbar, ungeplanter und kurzfristig hoher Bedarf entstehen kann oder Bestandsengpässe auftreten können. Die Schwankungen der Aufgabenumfänge bzw. der Produktions- oder Bearbeitungsgeschwindigkeiten können zu erheblichen Staus (Bestände) in der Produktion führen.¹⁹²

¹⁸⁶ Ohno, 1993, S.54.

¹⁸⁷ Vgl. Ohno, 1993, S.54 ff.

¹⁸⁸ Die Kanban Anwendungsregeln sind in Ohno, 1993, S.57 zu finden.

¹⁸⁹ Vgl. Kletti, 2011, S. 20.

¹⁹⁰ Vgl. Ohno, 1993, S.39.

¹⁹¹ Vgl. Ohno, 1993, S.64 ff., vgl. Dickmann, 2015, S.315;

Entwickelt wurde diese von deutschen Pionieren der Flugzeugindustrie, die sie nutzen um die Bewegungen von Flugzeugen in der Fließbandproduktion zu synchronisieren. Hierbei wird jedes größere Teilprodukt zur nächsten Station zur gleichen Zeit bewegt. Mitsubishi (vgl. Wikipedia.de, 2016: Mitsubishi ist eine japanische Marke unter welcher verschiedene Unternehmen bekannt sind. In den 1930/40-Jahren war es der größte Waffenproduzent in Japan und stellt u.a. Kampfflugzeuge her.) erlernte diese Technik durch seine Verbindung zur deutschen Flugzeugindustrie und brachte sie nach Japan und zu Toyota. (Vgl. Ohno, 1993, S.64 ff. und vgl. Dickmann, 2015, S.315).

¹⁹² Vgl. Ohno, 1993, S.39 ff., vgl. Dickmann, 2015, S.315.

Um diese Schwankungen der Produktionszeiten der unterschiedlichen Arbeitsgänge ausgleichen zu können, wurde im TPS die „Auslastungsglättung“ (jap.: *Heijunka*) eingeführt, welche zur „Beruhigung der Produktionsprozesse“¹⁹³ führt.

Ohno erläutert die Produktionsnivellierung anhand eines Arbeitsganges, welcher die vom nachfolgenden Arbeitsgang ungleichmäßig entnommene Menge an Teilen ausgleichen muss, um den weiteren Bedarf bedienen zu können. Dabei werden die Reservekapazitäten, welche für den Ausgleich nötig sind, entsprechend der Stärke der Schwankungen der entnommenen Menge beansprucht. In einer Lieferkette (Produktionsfluss) wirken sich diese Schwankungen auf alle vorgelagerten Arbeitsgänge aus. Um negative Auswirkungen zu vermeiden, werden die Produktionsspitzen gesenkt und die Produktionstäler angehoben. Um dieser Forderung gerecht zu werden, muss das System sehr flexibel gestaltet sein, um auf veränderte Bedingungen schnell reagieren können.¹⁹⁴

Die ebenfalls auf Baustellen regelmäßig anzutreffende kostenintensive Flexibilität („Feuerwehreaktionen“ / Beschleunigung, vgl. Kapitel 2.2.5) sollte durch eine langfristig geplante und standardisierte Flexibilität ersetzt werden.¹⁹⁵ Toyota erreichte eine gleichmäßige Auslastung des Produktionsbandes durch die Verkleinerung der Losgrößen. Die Produktionsnivellierung ist ein ständig zu wiederholender Prozess, welcher sich auf die gesamte Produktion auswirkt. So beeinflusste die Forderung von Toyota nach kleineren Losgrößen weitere Abteilungen, wie z.B. das Presswerk. Anstatt die Maschinen die größtmöglichen Lose durch kontinuierliches Arbeiten produzieren zu lassen, wurden Methoden entwickelt, um die Maschinen so schnell wie möglich umrüsten zu können und somit kleine Losgrößen produzieren zu können.¹⁹⁶ Diese ist somit eine Frühform des Wechsels der Einzelprozessoptimierung hin zur gesamtheitlichen Optimierung.

Weiterhin stellt die Produktionsnivellierung auch eine „Methode zur Sichtbarmachung von Problemen, die es zu lösen gilt“¹⁹⁷, dar, indem sie aufzeigt, wenn eine geplante Reihenfolge nicht eingehalten werden kann. Die Produktionsnivellierung ist heute im Bereich von Lean für die erfolgreiche Umsetzung des „Takt-Prinzips“ von Bedeutung (siehe Kapitel 5.3.4). Eine weitere Betrachtung von Fluktuationen liefert *Goldratt* im Zuge seiner „Engpasstheorie“, welche im Kapitel 5.4 erläutert wird.

5-W-Methode (Fünf-Warum-Methode)

Die Methode des fünffachen „Warum“ (auch 5-W-Ursachenanalyse¹⁹⁸) ist ein Ansatz des TPS, anhand dessen die wahre (verborgene) Ursache eines Problems (Grundproblem oder Ursprungsproblem), welches sich oftmals hinter augenscheinlicheren Anhaltspunkten verbirgt, ermittelt werden soll, anstatt nur die Symptome zu beheben.¹⁹⁹ Der Ablauf der Methode ist trivial. Ausgangspunkt ist stets ein bestimmtes, nachhaltig zu lösendes Problem, z.B. eine defekte Anlage. Es wird von diesem Problem ausgehend fünf Mal die Frage „Warum?“ gestellt (einmal bzgl. des Ausgangsproblems, vier Mal auf die jeweiligen Antworten), bis die tatsächliche Ursache für die Störung gefunden ist.²⁰⁰

¹⁹³ Dickmann, 2015, S.315.

¹⁹⁴ Vgl. Ohno, 1993, S.63 ff.

¹⁹⁵ Vgl. Dickmann, 2015, S.316.

¹⁹⁶ Vgl. Ohno, 1993, S.63 ff.

¹⁹⁷ Schröder, 2017, Produktionsnivellierung.

¹⁹⁸ Vgl. Dickmann, 2015, S.9.

¹⁹⁹ Vgl. ebenda, S.118.

²⁰⁰ Ein Beispiel für die Anwendung der 5-W-Methode ist in Ohno, 1993, S.43 f. zu finden.

7-W-Methode (5W2H-Methode)

Eine weitere bei Toyota angewendete Technik zur Hinterfragung des bisherigen Vorgehens stellt die 7-W-Methode dar, welche im Englischen auch als 5W2H-Methode bekannt ist. Bei dieser werden sieben Fragen (Was? Weshalb? Wo? Wann? Wer? Wie? Wie viel?²⁰¹) gestellt, um Informationen bzgl. des Ziels, Grundes, Ortes, Ablaufs, der Mitarbeiter, Methoden und Kosten zu erlangen.²⁰²

Wert-Box 07: Beispiele für die Anwendungsmöglichkeiten der Just-in-time-Methode und deren Hilfsmittel im Bereich der Baubranche

Damit die Kapazität des gesamten Bauprozesses optimal ist, ist eine Verfügbarkeit der DWEP auf dem Kritischen Weg notwendig. Im Optimalfall finden diese Prozesse nach der Just-in-time-Methode statt. Um ein komplexes System wie die Bauproduktion ziel führend steuern zu können sind verschiedene Hilfsmittel nötig. Die Anwendung von **Informationssystemen** (= **Kanban**) erscheint sinnvoll. Das entwickelte Prozessmodell sollte selbst eine Art Kanban darstellen, anhand dessen umgehend alle notwendigen aktuellen Informationen zu einem Prozess verfügbar sind, damit Verschwendungen durch Zeitverluste und Fehlerarbeiten minimiert werden. Auch die Ausstattung der Arbeitsmittel und Werkstoffe mit Kanbans (physische oder digitale Karten, RFID-Chip²⁰³) kann die Implementierung der Just-in-time-Methode unterstützen. So können beispielsweise alle Rohrstücke mit Kanbans (Informationen zu Einbauort-, -Zeit, Lagerplatz, etc.) ausgestattet werden, um eine zweckmäßige Lagerung auf der Logistikfläche und stetige Verfügbarkeit zu gewährleisten.

Das Prozessmodell sollte zur **Produktionsnivellierung** (Auslastungsglättung / Heijunka) beitragen, indem es durch die Dokumentation der Prozesse (insbesondere der Prozessdauer) Unstimmigkeiten und (starke) Schwankungen aufzeigt. Auf diese Weise können notwendige Anpassungen der Prozessplanung (Ressourcen, Prozessanordnung, Dauer) erkennbar gemacht werden.

5.2.4 Autonome Automation (*Jidōka*)

Die zweite, das TPS stützende Säule, ist die autonome Automation, welche auch als „Automation mit menschlichen Zügen“ oder kurz als „Autonomation“ (jpn. *Jidōka*) bezeichnet wird. „Automation“ beschreibt den Zustand einer Maschine, welche angeschaltet wird und dann von alleine läuft. „Autonomation“ beschreibt zusätzlich zum „automatischen Laufen“ die Fähigkeit der Maschine, Entscheidungen unter bestimmten Umständen autonom / eigenständig zu fällen. Der Maschine wird dabei ein Prüfsystem hinzugefügt, wodurch sie Probleme, Fehler oder abnormale Situationen selbstständig erkennen kann. Durch das sofortige Aufdecken von Abweichungen ist die Möglichkeit zum frühzeitigen Eingriff (Steuerung) gegeben und fehlerhafte Produkte bzw. Arbeiten und Verschwendungen werden vermieden.²⁰⁴

²⁰¹ Englisch: What? Why? Where? When? Who? How? How much?

²⁰² Ein Beispiel für die Anwendung der 7-W-Methode ist im Anhang zu finden.

²⁰³ Vgl. Dickmann, 2015, S.561

²⁰⁴ Vgl. Ohno, 1993, S.32 ff., vgl. Dickmann, 2015, S.9

Um ein solches Prüfsystem einführen zu können, wurden verschiedene Hilfsmittel bzw. Vorgehen entwickelt, welche sich zudem gegenseitig unterstützen. Drei dieser Hilfsmittel, die im in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodell eine Anwendung finden, stellen die verschiedenen Formen des Signalsystems „Andon“, die Entwicklung von Standardprozessen sowie das Fehlerdetektions- und Fehlervermeidungssystem „Poka Yoke“ dar. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Andon

Als *Andon* (dt. Laterne, Lampe) wird ein möglichst einfaches visuelles Signal (z.B. ein beleuchtetes Display oder eine Leuchtdiode) bezeichnet, welches auf ein Problem bzw. einen bestimmten Produktionsstatus aufmerksam macht. Diese i.d.R. elektronischen Anzeigetafeln²⁰⁵ erlauben zu jedem Zeitpunkt die vollständige Visualisierung aller notwendigen Informationen.²⁰⁶ Auf diese Weise wird Transparenz geschaffen und durch die visuelle Kontrolle wird eine gleichmäßige Produktion (anhand des Produktionsstatus kann die nachfolgende Produktion geplant werden) erreicht und auf mögliche Verschwendungen (fehlerhafte (Teil-)Produkte) aufmerksam gemacht. Eine Erweiterung dieses Systems kann die Einrichtung automatisierter elektronischer Übertragungsmedien sein, welche Informationen an bspw. die Lagerabteilung oder die Zulieferer (z.B. bei erkanntem Bedarf) oder an die Kunden (z.B. bzgl. des Fertigstellungszeitpunktes) übertragen.²⁰⁷

Im TPS wird das Andon für den Fließbandbetrieb eingesetzt das wie eine Ampel funktioniert. Eine grüne Leuchte bedeutet keine Störungen. Eine gelbe Leuchte schaltet ein Arbeiter ein, wenn er ein Problem entdeckt hat, dieses beheben und dazu Hilfe anfordern möchte. Ist das Problem schwerwiegender, wird das Band gestoppt und eine rote Leuchte wird angeschaltet.²⁰⁸

Standardprozesse (Standard Processes)

Damit Andon (A. Board und A. Cord) anwendbar und Abweichungen vom Normalzustand feststellbar sind, müssen die Prozesse und Vorgaben so gestaltet sein, dass Fehler sofort erkannt werden können. Für jeden Prozess muss ein Soll-Zustand vorhanden sein, der mit dem Ist abgeglichen wird. Zu diesem Zweck sind standardisierte Arbeitsabläufe, Arbeitspläne, Arbeitsanweisungen und ein Standardumlaufbestand zu entwickeln. Standardisierte Arbeitsabläufe werden als „Standard Work“²⁰⁹ bezeichnet und stellen eine festgeschriebene Reihenfolge von Arbeitsschritten dar, welche in einer bestimmten Taktzeit bzw. Zykluszeit auszuführen sind.²¹⁰

In der Fließfertigung muss das Produktionsteam aufgabenübergreifende Fähigkeiten besitzen und die eingesetzten Maschinen müssen zu jedem Zeitpunkt betriebsbereit sein. Aus diesem Grund müssen die Arbeiten „radikal standardisiert werden“.²¹¹

²⁰⁵ Handelt es sich nicht mehr um einen einfachen Signalgeber, so spricht man von *Andon Board*.

²⁰⁶ Vgl. Ohno, 1993, S.47, 148 und Dickmann, 2015, S.9.

²⁰⁷ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.72.

²⁰⁸ Hilfsmittel ist hierfür das *Andon Cord*, eine Leine, welche über dem Fließband entlangläuft. In moderneren Produktionen werden auch Knöpfe oder Displays des *Andon Boards* eingesetzt. Vgl. Ohno, 1993, S.148, vgl. Kaizen Institut, 2016.

²⁰⁹ dt. Standardarbeit.

²¹⁰ Vgl. TBM Consulting Group, 2016, vgl. Ohno, 1993, S.47.

²¹¹ Womack & Jones, 2013, S.77.

Nur Prozesse, welche identifizierbar, messbar und analysierbar sind, können korrekt kontrolliert, hinterfragt, verbessert oder entfernt werden.²¹² Anhand der standardisierten Prozesse ist es dem ausführenden Personal (und den Maschinen) möglich, Soll-Ist-Vergleiche durchzuführen und die Arbeiten nach jedem Prozessschritt zu kontrollieren. Diese Forderung wird auch im entwickelten Prozessmodell erfüllt, da insbesondere für kurzfristige Soll-Ist-Vergleiche standardisierte Prozessangaben unabdingbar sind.

Poka Yoke

Um Fehler und Defekte bereits vor ihrem Auftreten durch einfache Prüfprozesse, welche präventiv erfolgen, zu verhindern, wird *Poka Yoke*²¹³ eingesetzt. Hierunter wird ein Gerät oder Verfahren zur Fehlererkennung, Fehlervermeidung und somit zur Verhinderung größerer Probleme verstanden. Mit Hilfe von Poka Yoke soll sichergestellt werden, dass kein fehlerhaftes Zwischenprodukt oder Zwischenleistung zum nächsten Arbeitsschritt bzw. Prozess weitergegeben wird, da die Kosten für eine Fehlerbehebung ansteigen, je später der Fehler entdeckt wird. Das eingesetzte System bzw. Verfahren sollte den Prozessbearbeiter bei seiner Arbeit so unterstützen, dass dieser keine Möglichkeit hat, einen Fehler zu begehen. Es sollen so wenige Optionen wie möglich zur Auswahl stehen. Als Beispiel kann ein Stecksystem genannt werden, welches nur die korrekten Kombinationen zulässt.²¹⁴

Wert-Box 08: Wie können die Autonome Automation und deren Hilfsmittel im Prozessmodell angewendet werden?

Das Prozessmodell soll selbst als eine Art **Andon** funktionieren, indem es jederzeit die dringendsten Prozesse aufzeigt. Zum einen ist durch die Definition und die Auswahl des Leitprozesses (LP) eindeutig, dass dieser Prozess die höchste Priorität hat. Auch die parallel zum LP ausführbaren Prozesse sind je nach ihrer Dringlichkeit (Fälligkeit) zu kennzeichnen, damit die Sinnvollsten ggf. ebenfalls ausgeführt werden können.

Mit dem Prozessmodell soll ein **Standardverfahren** bereitgestellt werden, welches unabhängig vom Personal anwendbar ist und Lösungsmöglichkeiten in Problemsituationen liefert. Hierfür sind sowohl die Abläufe des Prozessmodells wie auch die Prozesse und die für diese hinterlegten Daten zu standardisieren.

Der Aufbau und die Kontrollen des Prozessmodells müssen dem **Poka Yoke** Prinzip folgen und dürfen nur ein Minimum an Möglichkeiten für die Anwendung zulassen, um keine Fehler in der Bedienung und somit in der Ergebnisausgabe zu zulassen.

²¹² Vgl. Womack & Jones, 2013, S.50.

²¹³ Auch Poka-Yoke oder Boka Yoke, dt. „unglückliche/unbeabsichtigte Fehler vermeiden, Narrensicherheit“.

²¹⁴ Vgl. TBM Consulting Group, 2016, vgl. Kaizen Institut, 2016, vgl. Ohno, 1993, S.151, vgl. Dickmann, 2015, S.9.

5.3 Lean Thinking

„Lean“ bedeutet übersetzt schlank und drückt aus, dass mit weniger Input mehr Output erreicht werden soll. Der Endverbraucher (bzw. Kunden) bestimmt den Wert eines Produktes oder einer Dienstleistung.²¹⁵ Der Hersteller (bzw. Leistungslieferant) hat das Ziel, den Bedarf des Kunden zu befriedigen. Somit ist der Wert für den Hersteller bestimmt, denn dieser muss den Bedarf des Kunden so exakt wie möglich erfüllen und dies so wirtschaftlich (d.h. mit den geringstmöglichen Kosten und Aufwand) wie möglich. Im Produktionsprozess minimiert der Hersteller seine Kosten, indem er jegliche Verschwendung eliminiert. Die Erstellung des Kundenwertes mit dem geringsten Aufwand soll mit den fünf „Lean-Prinzipien“ erreicht werden:²¹⁶

1. Spezifikation des (Kunden-)Wertes (durch das spezifische Produkt) (engl.: Value)
2. Identifikation des Wertstroms (für jedes Produkt) (engl.: Value stream)
3. Fluss des Wertes (ohne Unterbrechungen) (engl.: Flow)
4. Zug / Ziehen des Wertes (durch den (Prozess-)Kunden) (engl.: Pull)
5. Streben nach Perfektion, „Null-Fehler-Prinzip“ (engl.: Perfection)

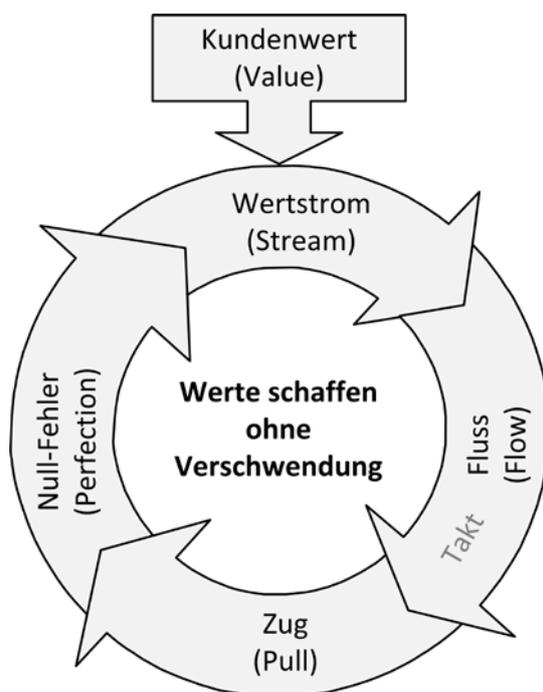


Abb. 24: Fünf Grundprinzipien des Lean Thinking ²¹⁷

Die fünf Prinzipien werden im Folgenden genauer betrachtet, wobei dem dritten Prinzip (Fluss) ein weiterer Unterpunkt hinzugefügt wird. Dieser beschäftigt sich mit dem „Takt“. Da die Implementierung eines Taktes von großer Bedeutung für den Erfolg des dritten Prinzips angesehen wird und da die Taktfertigung auch im Bauwesen eine immer größere Rolle spielt, wird dieser Punkt ebenfalls erläutert.

²¹⁵ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.23 ff.

²¹⁶ Vgl. ebenda, S.16.

²¹⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an Schuh, 2013, S.3.

5.3.1 Wert (Value)

Der Wert, welchen das jeweilige Produkt (bzw. die jeweilige Dienstleistung) für den Kunden hat, ist der Grund für eine Anbieter-Kunden-Beziehung. Der Wert stellt den „entscheidenden Ausgangspunkt von Lean Thinking“²¹⁸ dar. Allein der Kunde²¹⁹ kann den Wert bestimmen, welchen das Produkt für ihn hat. „Der Wert ergibt sich bezogen auf den Maßstab des Kunden.“²²⁰ Kunden sind als individuelle Persönlichkeiten (oder individuelle Institutionen, Unternehmen oder auch Prozesskunden) anzusehen, welche sich durch individuelle Bedürfnisse unterscheiden.²²¹ Der Hersteller (Anbieter der Leistung) ist für die Wertschöpfung verantwortlich.²²² Wert bedeutet, dass der Kunde exakt das bekommt, was, wann, wo und wie er es benötigt.²²³ Der Wert entspricht dem Leistungssoll.

Herstellungsverfahren, Herstellungsorte, Arbeitseinsatz und weitere zur Herstellung des Produktes notwendige Faktoren sind für den Kunden primär (mit Blick auf den Wert) nicht von Bedeutung.²²⁴ Erhält der Kunde nicht das von ihm benötigte Produkt, nicht zu der von ihm benötigten Zeit, nicht an dem von ihm benötigten Ort oder nicht in der für ihn notwendigen Qualität wird Verschwendung erzeugt.

Ohne die exakte Definition des Wertes aus Sicht des Endverbrauchers verspricht die Anwendung der weiteren „Lean-Prinzipien“ nur mäßigen Erfolg, da am Wert alle weiteren Aktionen ausgerichtet werden.²²⁵ Ein Grund, weshalb es häufig zu Problemen bei der Wertbestimmung kommt ist, dass je nach Aufgabe unterschiedlich viele Unternehmen oder Personen beteiligt sind. Diese sind für ihre jeweiligen Aufgaben spezialisiert, und es kommt zu unterschiedlichen Definitionen des Wertes. Eine weitere Ursache für die Schwierigkeit der Wertbestimmung liegt in der traditionellen Arbeitsweise. Produzenten stellen ihr Produkt (bzw. Varianten davon) her und bieten es den Kunden an. Der Lean-Gedanke steht für einen Wechsel des bloßen Leistungsangebots (push) zu einer Leistungsnachfrage (pull)²²⁶, welcher näher im Abs. 5.3.5 dargestellt wird.



Abb. 25: Wert-Kunde-Hersteller-Beziehung²²⁷

²¹⁸ Womack & Jones, 2013, S.24.

²¹⁹ Ausführliche Erläuterung des Begriffs „Kunde“ im Kapitel 5.5.1.

²²⁰ Erlach, 2010, S.9.

²²¹ Vgl. Heidemann, 2010, S.5.

²²² Vgl. Erlach, 2010, S.9.

²²³ Vgl. Gehbauer, 2014, S.8.

²²⁴ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.24 ff.

²²⁵ Vgl. ebenda, S.24.

²²⁶ Vgl. ebenda, S.41 ff.

²²⁷ In Anlehnung an Koskela, 2000, S.75.

5.3.2 Wertstrom (Value Stream)

Das zweite Lean-Prinzip ist die Identifikation des Wertstroms. Die Ermittlung des Wertstroms ist nur nach der eindeutigen Definition des Wertes (erstes Lean-Prinzip) möglich. Unter einem Wertstrom²²⁸ sind alle Aktivitäten (wertschöpfende und nicht-wertschöpfende) zu verstehen, die notwendig sind, um ein Produkt durch die Hauptströme (auch Materialstrom, Materialfluss, Fertigungsstrom, Entwicklungsstrom²²⁹ genannt) zu bringen, die für jedes Produkt entscheidend sind.²³⁰

In einem weiteren Strom - dem Informationsstrom - werden die von den jeweiligen Stationen (Prozessen) zu erbringenden Leistungen kommuniziert, indem die transferierten Daten und Dokumente zwischen den einzelnen Prozessen beschrieben werden. Der Informationsstrom fließt entgegen der Produktionsrichtung (Materialstrom). Ausgehend vom Endkunden werden die Informationen bzgl. des Wertes an die jeweils vorangehende Station gegeben. Jede Station (Prozess) hat mindestens einen direkten Kunden, für den er eine Leistung erbringt. Auf diese Weise wird für jeden Prozess aufgezeigt, was für den nächstfolgenden Prozess wann, wie und wo zu erbringen ist.²³¹

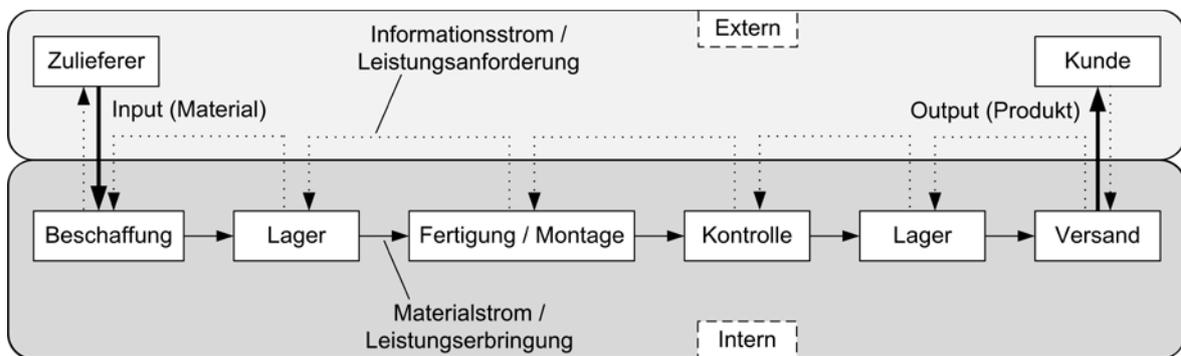


Abb. 26: Beispiel für Materialstrom und Informationsstrom²³²

Die Wertstromanalyse (WSA)²³³ ist eine Methode zur Prozessanalyse und -verbesserung, anhand welcher herausgefunden werden kann, ob und wie der Wert von Station zu Station erhöht wird. Hierbei gilt die Prämisse von *Womack* und *Jones*, dass nur Aktivitäten bzw. Tätigkeiten, welche identifiziert, gemessen, analysiert und verbunden werden können, auch hinterfragbar, verbesserbar, entfernbar und perfektionierbar sind.²³⁴

Anhand von WSA werden Verschwendungen im Produktionsprozess aufgezeigt, indem bei der Untersuchung der Prozesse (Ist-Situation) verschiedene Prozessgrößen (Kennwerte) ermittelt und untersucht werden. Durch das Aufzeigen der Ursachen für Verschwendungen (z.B. schlechte Organisation, falsche Anordnungen, zu langsame Maschinen, zu schnelle

²²⁸ In der Literatur werden sowohl die Begriffe Strom, also auch Fluss oder der englische Begriff *Stream* verwendet. Da mit dem Begriff Flow, Fluss oder Fließen ein weiterer Lean Aspekt beschrieben wird (siehe Kapitel Fluss (Flow) 5.3.3), wird für den Wertstrom, welcher in diesem Kapitel beschrieben wird, der Begriff Strom einheitlich verwendet.

²²⁹ Rother & Shook, 2011, S.3: Verwendung der Begriffe Hauptfluss, Fertigungsstrom (vom Rohmaterial bis in die Hände des Kunden) und Entwicklungsstrom (vom Produktkonzept bis zum Produktionsstart).

²³⁰ Vgl. Rother & Shook, 2011, S.3.

²³¹ Vgl. Rother & Shook, 2011, S.24-25, vgl. Erlach, 2010, S.32 ff.

²³² Eigene Darstellung in Anlehnung an Rother & Shook, 2011, S.26-27, Weiß et al., 2015, S.64.

²³³ Auch Wertstromdesign (WSD) oder Value Stream Mapping (VSM).

²³⁴ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.50.

Maschinen, etc.) und für das unwirtschaftliche Arbeiten kann ein Soll-Zustand definiert werden. Hierfür werden alle Tätigkeiten (im Sinne der im Kapitel 3.1 gegebenen Definition der Prozesskategorien) innerhalb eines Wertstroms in drei Kategorien unterteilen: ²³⁵

1. Tätigkeiten, welche aus Sicht des Kunden tatsächlich einen Wert erzeugen.
Genannt wertschöpfende Tätigkeit. (Prozess: DWEP)
2. Tätigkeiten, welche aus Sicht des Kunden keinen Wert direkt erzeugen, aber für die Werterzeugung notwendig sind.
Genannt Scheinleistung oder „Muda Typ I“. (Prozess: IWEP)
3. Tätigkeiten, welche aus Sicht des Kunden keinen Wert erzeugen und entfernbar sind.
Genannt Blindleistung oder „Muda Typ II“. (Prozess: NWEP)

Auch *Girmscheid* nimmt eine ähnliche Aufteilung der bei einem Bauprojekt auftretenden Tätigkeiten in Bezug auf die Arbeitszeiten vor:

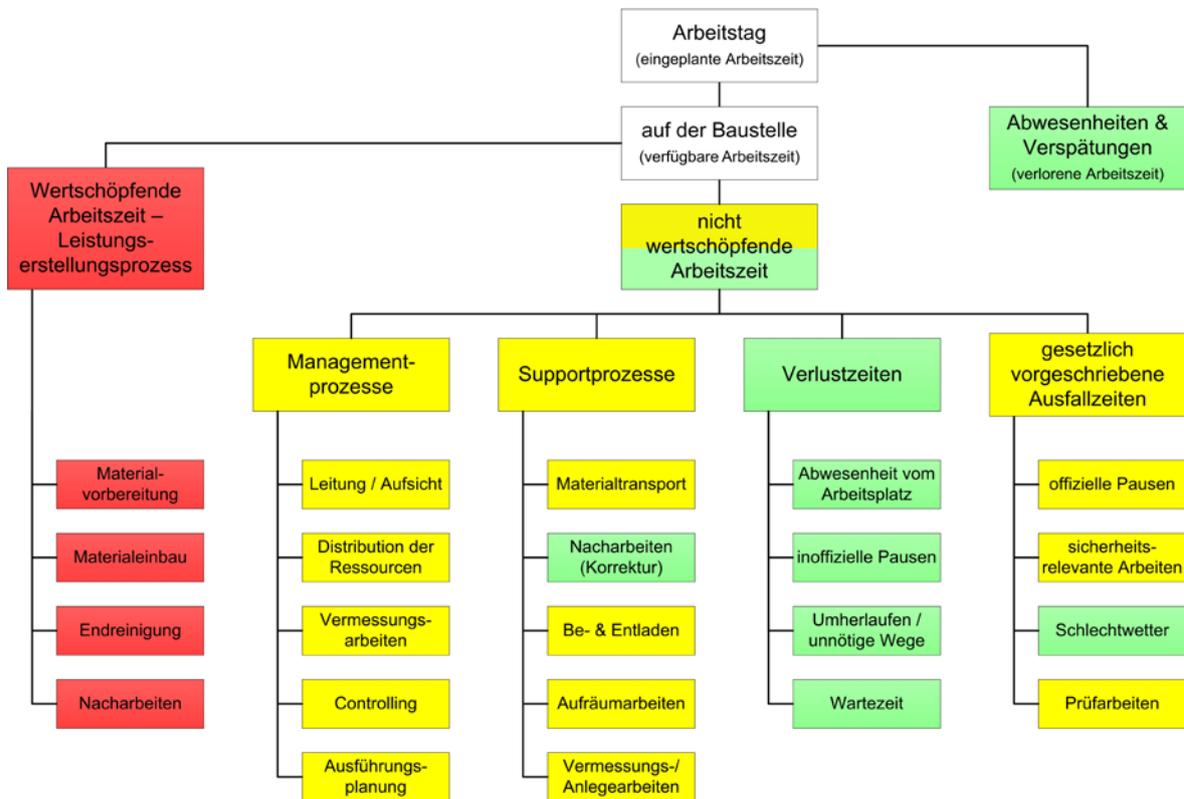


Abb. 27: Systematisierung der Arbeitszeiten auf einer Baustelle²³⁶

Im Bereich des Bauwesens ist eine WSA im großen Maßstab über das gesamte Projekt, von den Zulieferern über die Planer bis zur Bauausführung möglich. Und auch im kleinen Maßstab, z.B. innerhalb eines einzelnen Raumes, kann eine WSA sinnvoll sein. In beiden Fällen müssen das Gesamtsystem und dessen Optimierung im Fokus stehen. ²³⁷

²³⁵ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.51.

²³⁶ In Anlehnung an Girmscheid, 2010, S.526. Die Farbgebung ist angelehnt an Kapitel 3.1.

²³⁷ Vgl. Hermes, 2017, S.8.

5.3.3 Fluss (Flow)

Das dritte Lean-Prinzip ist der Fluss des Wertes. Nachdem der Wert eines Produktes im ersten Schritt genau definiert und dessen Wertstrom bis zum Endkunden im zweiten Schritt vollständig analysiert wurde, müssen die darin erkannten werterzeugenden Schritte, also die Konstruktion, die Auftragsabwicklung und das Bereitstellen des Produktes kontinuierlich fließen.²³⁸ Hierbei wird jedem Prozess (Station, Arbeitsgang) eine bestimmte Arbeitsmenge (zu erfüllende Sollleistung) zugeordnet, welche innerhalb einer bestimmten, vorgegebenen Zeit (der sog. Taktzeit, siehe Abs. 5.3.4) zu erbringen ist.²³⁹ Die Konzentration wurde lange Zeit auf die Optimierung von einzelnen Prozessen gelegt, ohne das übergeordnete Gesamtsystem zu berücksichtigen.²⁴⁰ Durch die Anwendung von Lean-Methoden ist es möglich die Produktivität der Gesamtproduktion zu erhöhen, indem die einzelnen (Teil-)Produkte „alleine“ durch das System (den Materialstrom) fließen, anstatt in großen Losgrößen zusammengefasst zu werden.²⁴¹ Dieser Eins-zu-Eins-Fluss²⁴² stellt den direkten Fluss des Produktes von einer Station zur nächsten dar, ohne dass dieser in Beständen zwischengelagert oder durch Wartezeiten aufgehalten wird.²⁴³ *Womack* und *Jones* beschreiben diesen Schritt als die Konzentration auf das tatsächliche Objekt, welches von Anfang bis Ende nicht mehr aus den Augen verloren werden darf.²⁴⁴

Eine weitere essentielle Voraussetzung, um einen Arbeitsfluss zu erreichen, ist die von *Adam Smith* geprägte Arbeitsteilung bzw. Spezialisierung.²⁴⁵ Die Geschicklichkeit und der ständige technische Fortschritt sind im gesamtheitlichen Ansatz ein Hilfsmittel, um den Wert des Endproduktes zu der geforderten Zeit, in der geforderten Qualität und zu den geforderten Kosten liefern zu können.

Auf das Bauwesen bezogen sieht auch *Gehbauer* den Einzelstückfluss als gute Methode zur Produktivitätssteigerung an, da in der Baubranche die Tendenz besteht, in großen Mengen zu bestellen (bspw. Bewehrungsstahl, Mauersteine), in großen Mengen zu produzieren und Stapel zu bilden. Diese müssen dann vom nächsten Gewerk abgearbeitet werden, nachdem diese „hingeschoben“ (Push-Prinzip) wurden. Doch beim Fluss-Prinzip steht der Fluss der Einzelstückfertigung im Vordergrund, nicht die lokalen Optima.²⁴⁶

Beispiel Einzelfluss

Ein Beispiel soll den möglichen Nachteil lokaler Optima (Bildung von Arbeitspaketen) gegenüber der Effizienz des Einzelflusses im Gesamtprozess verdeutlichen.

In Abb. 28 ist eine Warteschlange für unterschiedliche, zu erbringende Aufgaben vor drei Maschinen dargestellt. Jede Maschine kann jede der Aufgaben in 3 Minuten erbringen. Ist eine identische Aufgabe zweimal hintereinander (in einer Losgröße / einem Arbeitspaket) zu erbringen, reduziert sich die Bearbeitungszeit (Summe beider Aufgaben) um eine Minute. Bei dreimaliger Wiederholung (in einer Losgröße / einem Arbeitspaket) um zwei

²³⁸ Vgl. *Womack & Jones*, 2013, S.30 ff.

²³⁹ Vgl. *Bregenhorn*, 2015, S.16.

²⁴⁰ Vgl. ebenda, S.28.

²⁴¹ Vgl. *Gehbauer et al.*, 2011, S.39.

²⁴² Auch One-Piece-Flow oder 1x1-Fluss, vgl. *Hofacker*, 2010, S.31.

²⁴³ Vgl. *Liker*, 2014, S.144 ff., vgl. *Rother & Shook*, 2011, S.41.

²⁴⁴ Vgl. *Womack & Jones*, 2013, S.68.

²⁴⁵ Vgl. *Smith*, 1974, S.12 ff.

²⁴⁶ Vgl. *Gehbauer et al.*, 2011, S.39.

Minuten (Summe aller drei Aufgaben). Die ersten drei Aufgaben (Aufgabe 1, 2 und 3) sind identisch. Es ist also möglich, sie in einer Losgröße zusammenzufassen. Aufgabe 3 ist dabei zeitkritisch, sollte also so schnell wie möglich erbracht werden. Zu Beginn sind die Maschinen teilweise noch mit vorherigen Aufgaben belegt. **Maschine B** benötigt noch eine Minute für eine Aufgabe, **Maschine C** noch zwei Minuten, und **Maschine A** ist sofort verwendbar.

In Abb. 29 ist zu erkennen, dass, um die Zeitersparnis der mehrfachen Aufgabenerbringung auszunutzen, die Aufgaben 1, 2 und 3 zusammen an Maschine A erbracht werden. Für Aufgabe 1 werden 3 Minuten, für Aufgabe 2 nur noch 2 Minuten und für Aufgabe 3 nur noch 1 Minuten benötigt. Das Gesamtpaket ist somit nach 6 Minuten fertig.

Die weiteren Aufgaben verteilen sich auf die Maschinen, sobald diese frei sind. Aufgabe 4 ist nach Minute 4 erledigt, Aufgabe 5 nach Minute 5, Aufgabe 6 nach Minute 7, Aufgabe 7 nach Minute 8, Aufgabe 8 nach Minute 9 und Aufgabe 9 nach Minute 10.

Die Aufgaben 1, 2 und 3 sind somit in der Rangfolge für die weitere Bearbeitung nicht mehr an den ersten drei Rängen, sondern wurden von den Aufgaben 4 und 5 überholt, obwohl ihre Bearbeitungszeit durch das Zusammenfassen zu einer größeren Losgröße optimiert wurde.

Auch die Reduzierung der Bearbeitungszeit der zeitkritischen Aufgabe 3 führt nur zu einem lokalen Optimum, nicht jedoch zu einer Optimierung des Gesamtprozesses. Gesamtheitlich betrachtet wäre für Aufgabe 3 optimal gewesen, wenn diese als erste an Maschine A kommt.²⁴⁷

Aufgaben	Maschine A	Maschine B	Maschine C	Rangfolge
	Restzeit Auslastung: 0	Restzeit Auslastung: 1	Restzeit Auslastung: 2	
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				

Abb. 28: Beispiel Vergleich Einzelstückfluss und Arbeitspakete - Ausgangssituation²⁴⁸

Aufgaben	Maschine A	Maschine B	Maschine C	Rangfolge
	Restzeit Auslastung: 0	Restzeit Auslastung: 1	Restzeit Auslastung: 2	
1	2	3	+6	
8			+9	
		4	+4	4
		6	+7	5
		9	+10	1
				2
				3
				6
				7
				8
				9

Abb. 29: Beispiel Vergleich Einzelstückfluss und Arbeitspakete - Resultat

²⁴⁷ Beispiel in Anlehnung an Gehbauer et al., 2011, S.39 ff.

²⁴⁸ Abbildung zum Beispiel in Anlehnung an Gehbauer et al., 2011, S.40.

Neben der Reduzierung der Durchlaufzeit ergeben sich durch die Schaffung einer fließenden Produktion weitere Vorteile des Einzelstückflusses:²⁴⁹

1. Qualitätsverbesserung

Jeder Arbeiter bzw. Prozessverantwortliche ist als Kontrolleur tätig. Durch kleinere Losgrößen und eindeutige Standardprozesse werden weniger Fehler gemacht und seltener Fehler bzw. Mängel an die nächste Station bzw. den nächsten Prozessverantwortlichen weitergegeben.

2. Erhöhung der Flexibilität

Aufgrund kürzerer Durchlaufzeiten und kleiner Losgrößen kann auf Schwankungen schneller reagiert werden.

3. Produktivitätssteigerung

Es kommt zu weniger Überproduktion, durch den Fluss werden keine Bestände angehäuft und aufgrund der Qualitätserhöhung werden mehr wertschöpfende Arbeiten verrichtet. Es wird schnell ersichtlich, welcher Prozessschritt bzw. welcher Arbeiter überlastet ist und die Produktion kann nivelliert werden.

4. Reduzierung der Arbeits- bzw. Werksfläche

Durch Verringerung der Bestände wird weniger Fläche für Zwischenlager benötigt. Kosten für nicht benötigte Lagerflächen und veraltete Lagerbestände können reduziert werden.

5. Steigerung der Arbeitszufriedenheit

Durch die eindeutigen Standardprozesse, die eindeutigen Vorgaben der (Prozess-) Kundenanforderungen, die Verrichtung von mehr werthaltiger Arbeit und umgehendes Feedback steigt die Arbeitszufriedenheit an.

5.3.4 Takt

Auch in der stationären Industrie ist die erfolgreiche Durchsetzung des Fluss-Prinzips, trotz der Tatsache, dass das Produkt in den meisten Fabriken die Produktion wortwörtlich durchfließt, nur mit verschiedenen Hilfsmitteln möglich. Eines dieser Hilfsmittel ist die im Kapitel 5.2.3 bereits dargestellte Produktionsnivellierung (jpn. *Heijunka*). Mit Hilfe dieser Technik lässt sich mit der Zeit eine optimale Zeiteinheit und eine optimale Arbeitsmenge für jeden einzelnen Prozess ermitteln, damit die Produktion zu fließen beginnt. *Erlach* beschreibt dies als die „Stimmigkeit der einzelnen Prozesse untereinander.“²⁵⁰

Taktplanung und Taktsteuerung in der stationären Industrie

In den meisten Produktionsstätten der Automobilindustrie²⁵¹ wird mathematisch festgelegt, wie viel Zeit zwischen der Fertigstellung eines Fahrzeugs und der des nächsten Fahrzeugs

²⁴⁹ Vgl. Liker, 2014, S.146 ff.

²⁵⁰ Vgl. Erlach, 2010, S.108.

²⁵¹ Beispielsweise bei der Porsche AG. Die Dr. Ing. h.c. F. Porsche Aktiengesellschaft mit Sitz in Stuttgart-Zuffenhausen wurde 1931 von Ferdinand Porsche in Stuttgart als Konstruktionsbüro gegründet und nach 1945 in eine Automobilfabrik umgewandelt. Seit 2009 ist Porsche Teil des Volkswagen-Konzerns. <http://www.porsche.com/germany>.

vergehen darf.²⁵² Es wird eine gleichmäßige Produktionsgeschwindigkeit ermittelt, wobei die Autos während ihrer Herstellung²⁵³ eine bestimmte Zeit, genannt Produktionszeit, in der Fabrik verbringen. Während dieser Zeit befinden sich die Autos nur jeweils einen bestimmten Zeitraum an den einzelnen Stationen der Fabrik.²⁵⁴ Die Prozesse werden harmonisiert - die Arbeiten zeitlich gesehen gleichmäßig verteilt - damit jeder Prozess in dieser Zeit erbringbar ist.²⁵⁵ Diese Zeit wird als „Taktzeit“ bezeichnet.²⁵⁶ Sie gibt die mögliche Arbeitsleistung wieder, mit deren Hilfe die aktuelle Produktivität und Abweichungen vom Leistungssoll dargestellt werden können.²⁵⁷

Die Taktzeit drückt aus, „wie viel Sekunden oder Minuten pro Teil zur Verfügung stehen, damit der Kundenbedarf erfüllt werden kann.“²⁵⁸

$$\text{Taktzeit} = \frac{\text{Nettoarbeitszeit}}{\text{Kundenbedarf}}$$

Formel 6: Taktzeit bzgl. des Kundenbedarfs²⁵⁹

Der durch diesen Takt bestimmte Rhythmus gilt für alle Arbeitsabläufe in der gesamten Fabrik. Auf diese Weise entsteht ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Fluss. Der Takt wird auch als Herzschlag der Produktion bezeichnet.²⁶⁰ Wie die Taktplanung und -steuerung in der Bauindustrie Anwendung findet, wird in Kapitel 5.5.2 dargestellt.

5.3.5 Zug (Pull)

Das vierte Lean Prinzip, das Zug-Prinzip²⁶¹, ist bedeutend, um eine gleichmäßige Produktionsgeschwindigkeit und einen stetigen Arbeitsfluss zu erreichen. Der Begriff Zug (engl. Pull) drückt aus, dass ein bestimmtes Produkt (Teil, Ware, Dienstleistung, Prozess) von einem (Prozess-)Kunden abgerufen wird (zu sich durch die Produktion gezogen²⁶²), anstatt dass ihm dieses Produkt angeboten wird (zu ihm hingeschoben, Push Prinzip).²⁶³ Es wird hierbei gefordert, dass ein Prozess (Herstellung eines Produktes, Erbringung einer Dienstleistung, Ausführung einer Aktivität) erst erbracht bzw. durchgeführt wird, sobald ein nachgelagerter Kunde (End- oder Prozesskunde) diesen abrufen (bestellt, nachfragt). Ein Fertigungsfluss (eine Fließfertigung) kann nur entstehen, wenn benötigte Teile von der nächsten Stufe nachgefragt werden. Jeder Prozess zieht den vorherigen Prozess nach sich.²⁶⁴

²⁵² Vgl. Suzaki, 1989, S.125.

²⁵³ Das Zusammensetzen und Zusammenbauen bereits vorgefertigter und teilweise von Zulieferern angefertigter Einzelteile zu einem Endprodukt.

²⁵⁴ Hierbei handelt sich also um die Zeit, welche für die Herstellung bzw. Bearbeitung einer bestimmten Einheit vorgesehen ist. Vgl. Ohno, 1993, S.48.

²⁵⁵ Vgl. Motzko, 2013, S.43.

²⁵⁶ Im Beispiel des Porschewerkes beträgt sie 3 Minuten 44 Sekunden. Eigene Notiz bei der Werksführung des Porschewerkes Stuttgart-Zuffenhausen, am 18.06.2015, im Rahmen des 26. BBB-Assistententreffens in Stuttgart.

²⁵⁷ Vgl. Hofacker, 2010, S.47 ff.

²⁵⁸ Brenner, 2016, S.4

²⁵⁹ Ebenda, S.4

²⁶⁰ Vgl. Friedrich, 2013, S.43

²⁶¹ Auch „Hol-Prinzip“, Zollondz, 2013, S.198

²⁶² Vgl. Zollondz, 2013, S.198

²⁶³ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.35

²⁶⁴ Vgl. ebenda, S.85 ff.

Eine Möglichkeit, das Zug Prinzip darzustellen, insbesondere mit Blick auf die Anforderungen der Baubranche, ist die von *Ohno* beschriebene Stabübergabe. Hierbei beschreibt er, dass die alltägliche Arbeit mit einem Staffellauf verglichen werden kann. An den Schnittstellen (z.B. zwischen Kollegen, Abteilungen, Gewerken oder Unternehmen) kommt es zu Bereichen, in welchen der „Stab“, also eine bestimmte Arbeit übergeben wird. Je reibungsloser und harmonischer diese Übergabe von statten geht, desto besser wirkt sich dies auf die Gesamtperformance aus.²⁶⁵

Die Bauproduktion folgt aufgrund der vorgegebenen Terminplanung i.d.R. dem Push Prinzip, bei welchem stets nach zukünftigen Knoten- bzw. Kreuzungspunkten von gegenseitig abhängigen Leistungen gesucht wird.²⁶⁶ Hierbei werden Arbeiten fertiggestellt und anschließend an die nächste Station (das nächste Gewerk - „Prinzip der Arbeitsfreigabe“²⁶⁷) übergeben. Jedoch wird auch im Bauwesen in bestimmten Situationen das Zug Prinzip angewendet, so z.B. bei der Bestellung von Beton. Dieser kann aufgrund seiner vergleichsweise kurzen Verarbeitungszeit nicht allzu früh bestellt werden, ist jedoch wegen seiner relativ schnellen Lieferzeit eine Leistung, welche optimal für das Zug Prinzip und die Just-in-time Produktion geeignet ist.²⁶⁸

Womack und *Jones* wie auch *Ohno* sehen die Vorteile des Zug Prinzips insbesondere in der Reduzierung der Lagerbestände (siehe 5.2.2.).²⁶⁹ Hierbei können verschwenderische Umsatzprognose verringert werden, da nur noch hergestellt wird, was der Kunde abrufft. Auch das Nachfrageverhalten der Kunden wird stabiler, da diese die Sicherheit haben, dass ihr Bedarf zum benötigten Zeitpunkt, am benötigten Ort und in der benötigten Qualität gedeckt wird.²⁷⁰

Speziell bei der Bauproduktion ist eine kontinuierliche Fließfertigung, wie sie in der stationären Produktion angestrebt wird, oft nicht möglich. Dies hat i.d.R. seine Ursache in den großen Losgrößen, welche aus verschiedenen Gründen nicht vermieden werden können:²⁷¹

1. Die Prozesse und die Planung der zeitlichen Eingliederung dieser beruht i.d.R. auf Schätzungen und Erfahrungswerten.
2. Prozesse haben eine sehr lange oder sehr kurze Zykluszeit und müssen, um ggf. verschiedene Produktfamilien herstellen zu können, umgerüstet werden. (Beispiel: Bewehrungsstahl)
3. Die Lieferung einer zu kleinen Losgröße ist unrealistisch. (Beispiel: Ortbeton)
4. Prozesse sind zu unzuverlässig (schwankend) / der Prozessoutput ist probabilistisch (Beispiel Tunnelvortrieb: Geologie und folglich die Vortriebsgeschwindigkeit).

Eine Methode, anhand welcher sich das Zug-Prinzip und die Taktsteuerung in komplexen Prozessnetzen implementieren lassen, stellt die „Drum-Buffer-Rope Methode“ dar. Diese ist ein Werkzeug der Engpasstheorie, welche im Kapitel 5.4 näher dargestellt wird.

²⁶⁵ Vgl. *Ohno*, 1993, S.51

²⁶⁶ Vgl. *Ballard*, 2000 (2), S.3-10 f.

²⁶⁷ *Gehbauer et al.*, 2011, S.34

²⁶⁸ Vgl. *Ballard*, 2000 (2), S.3-12.

²⁶⁹ Vgl. *Ohno*, 1993, S.46: Verschwendungsart 1 Überproduktion und Verschwendungsart 5 Lagerbestände.

²⁷⁰ Vgl. *Womack & Jones*, 2013, S.34.

²⁷¹ Vgl. *Rother & Shook*, 2011, S.42.

5.3.6 Null-Fehler (Perfection) / KVP

Das Null-Fehler-Prinzip ist bei der Anwendung aller anderen Lean-Prinzipien, bei jeder Maßnahme, zu jeder Zeit und in jeder Situation zu berücksichtigen. Es ist unter verschiedenen Bezeichnungen bekannt (Null-Fehler-Prinzip, Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP), Perfektionsprinzip, Total Quality Management (TQM), Kaizen, PDCA-Zyklus), jedoch sind die Aussagen und die Forderungen, welche alle Konzepte treffen, nahezu die gleichen.

Das Null-Fehler-Prinzip bedingt die wiederholte Durchführung aller Lean-Maßnahmen (Methoden), wodurch ein immer wirtschaftlicherer Herstellungsprozess des vom Kunden bestellten Wertes erreicht wird. Dem Optimum für dieses Ziel wird somit durch ständige Wiederholung aller Lean-Prinzipien immer nähergekommen. Aus diesem Grund wird im Englischen für dieses Prinzip der Begriff „*Perfection*“ verwendet, mit welchem das Streben nach der Perfektion, also eine kontinuierliche Verbesserung, gemeint ist.²⁷²

Der wohl bekannteste Verbesserungszyklus ist der PDCA-Zyklus²⁷³, welcher insbesondere für wissenschaftliche Experimente verwendet wird. Dieser stellt die kontinuierliche Verbesserung eines Prozesses in vier Schritten dar: Plan, Do, Check, Act (dt.: Planen, Umsetzen/Durchführen, Überprüfen, Reagieren).²⁷⁴

Seinen Ursprung hat das Null-Fehler-Prinzip im *Kaizen*-Prinzip des Toyota Produktionssystems. „*Kaizen*“ (dt. Vervollkommnung, Verbesserung²⁷⁵) stellt das wichtigste japanische Managementkonzept dar und lässt sich als ständige Verbesserung unter Einbeziehung aller Mitarbeiter beschreiben.²⁷⁶ Der Begriff steht für die Einstellung „ständiges Verbessern um der Verbesserung willen zu betreiben“.²⁷⁷

In der Managementpraxis wird der Begriff **Kontinuierlicher Verbesserungsprozess** (KVP, engl.: Continuous Improvement Process (CIP)) verwendet. „Der KVP [...] ist das Führungsinstrument, das möglichst alle Mitarbeiter eines Unternehmens dazu bewegen und befähigen soll, in einem ständigen Bemühen und in Teamarbeit Verbesserungen im alltäglichen Arbeitsprozess zu erarbeiten.“²⁷⁸ Der KVP ist der Motor der Fortbewegung, der eine systematische und langfristige Verbesserung des Unternehmens ermöglicht.²⁷⁹ Dabei werden Verbesserungen in Standardprozessen festgehalten, um den Zustand zu erhalten und weitere Verbesserungsprozesse zu ermöglichen, wie in der folgenden Abbildung dargestellt ist.

²⁷² Vgl. Kletti, 2011, S.9.

²⁷³ Auch Deming-Zyklus bzw. -Kreis, Shewhart-Zyklus.

²⁷⁴ Vgl. Burrows, 2015, S.26.

²⁷⁵ Der Begriff Kaizen setzt sich aus Kai (= verbessern) und Zen (= gut) zusammen.

²⁷⁶ Vgl. Imai, 1993, S.15.

²⁷⁷ Haß, 1995, S.24.

²⁷⁸ Witt & Witt, 2015, S.16.

²⁷⁹ Vgl. Scholz et al., 2003, S.71.

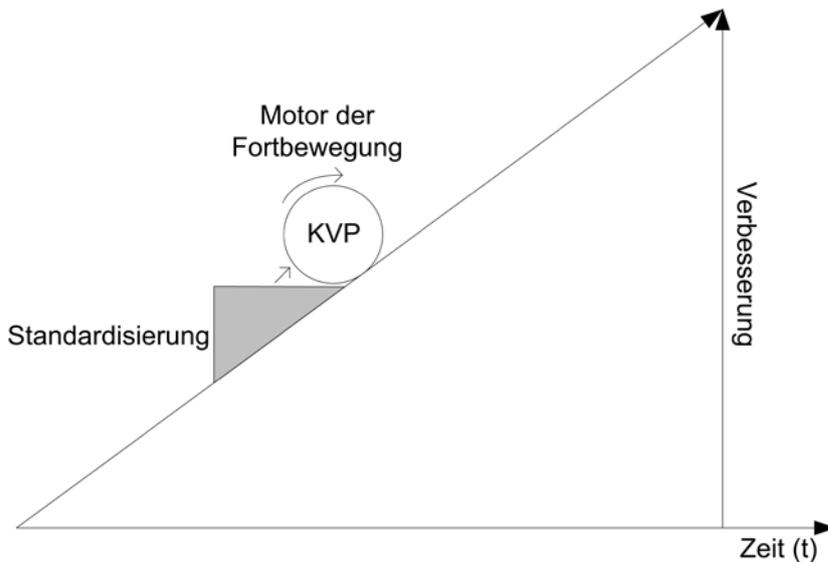


Abb. 30: KVP als Motor²⁸⁰

Das fünfte Lean-Prinzip ist in Bezug auf das Bauwesen aus zwei Sichtweisen zu betrachten. Zum einen ist das Null-Fehler-Prinzip als das Streben nach Perfektion des gesamten Systems und all seiner Anteile zu sehen. Durch die kontinuierliche Erfassung, Analyse und dauerhafte Beseitigung von Fehlern in den einzelnen Prozessen entlang der Wertschöpfungskette, wie auch in der Planung und der damit verbundenen Prozessstandardisierung kann die Menge an Verschwendungen systematisch reduziert werden.

Zum anderen ist das Null-Fehler-Prinzip als die direkte Verhinderung der schlimmsten Verschwendungsart im Bauprojekt, der Mängel, zu sehen. *Kirsch* stellt fest, dass großer Aufwand für die Qualitätskontrolle erst am Ende der Prozesskette erbracht wird, um fehlerhafte Produkte ausfindig zu machen und diese durch Nacharbeit zu beheben.²⁸¹ Dies lässt sich mit Blick auf die Bauproduktion durchaus bestätigen.

Fehler können in jedem System auftreten, unabhängig davon, ob Menschen oder Maschinen an der Erstellung von Produkten oder Dienstleistungen beteiligt sind. Einen Fehler weiter durch das System laufen zu lassen und diesen unter Umständen erst vom Kunden erkennen zu lassen ist Verschwendung von Zeit, Ressourcen, Ansehen, Vertrauen und somit von Geld. Speziell im Bauwesen muss also auf diesen Punkt ein besonderer Fokus gelegt werden. Mängel erhöhen die Kosten desto mehr, je später sie entdeckt werden. Werden fehlerhafte Produkte erkannt, werden diese nachgearbeitet, kommen in ein Zwischenlager oder werden entsorgt.²⁸² Mängel am Bauwerk müssen zurückgebaut, abgerissen, erneuert oder komplett entsorgt werden. Der Aufwand für die Prozesse zwischen dem Auftreten des Fehlers und seiner Entdeckung sind in diesem Fall als Verschwendung anzusehen. Somit sind das nachhaltige Abbauen von Fehlerursachen und das sorgsame Dokumentieren dieser Voraussetzung, um zukünftige Prozessschwankungen zu vermeiden und somit eine fließende Wertschöpfung zu ermöglichen.²⁸³

Allen beschriebenen Theorien ist die Annahme gemein, dass kein Betrieb, keine Produktion und kein Prozess kurz- oder langfristig ohne Probleme sind. Eine vollständige Beseitigung

²⁸⁰ Kirsch, 2009, S.42.

²⁸¹ Vgl. Kirsch, 2009, S.44.

²⁸² Vgl. Scholz et al., 2003, S.61.

²⁸³ Vgl. Kirsch, 2009, S.44.

von Verschwendung ist nicht möglich.²⁸⁴ Somit wird in allen Theorien die Perfektion nicht als Ziel (unerreichbar) gesehen, sondern als Prozess, anhand dessen jeder Bereich eines Unternehmens ständig verbessert wird, um den tatsächlichen, übergeordneten Zielen der Kundenzufriedenheit und der Wirtschaftlichkeit näher zu kommen.

Das Streben nach Perfektion kann mit drei Prinzipien zur Schaffung robuster Prozesse dargestellt werden (siehe Abb. 31).

Hierbei soll die Qualität durch Arbeitsroutinen (Standardisierte Arbeitsvorgaben) und präventive Maßnahmen zur Fehlervermeidung erbracht werden. Diese Maßnahmen umfassen die regelmäßige Kontrolle der Betriebsmittel, die Reinigung und vorbeugende Wartung der Maschinen, die statische Prozesskontrolle zur Fehlerfrüherkennung sowie Vorrichtungen und Hilfsmittel um Verwechslungen auszuschließen. Sollte ein Fehler auftreten, muss dieser möglichst schnell in einer fortlaufenden Qualitätskontrolle erkannt werden. Diese erfolgt nach jedem Prozessschritt. Mit Hilfe von standardisierten Routinen werden die Fehlerursachen analysiert, der Verantwortliche für die Fehlerbehebung identifiziert und die Schritte zur Fehlerbehebung festgelegt. Die Fehlerursachen werden nachhaltig mithilfe von Standardabläufen zur Fehlerursachenfindung und -analyse beseitigt und somit das erneute Auftreten eines Fehlers vermieden.²⁸⁵

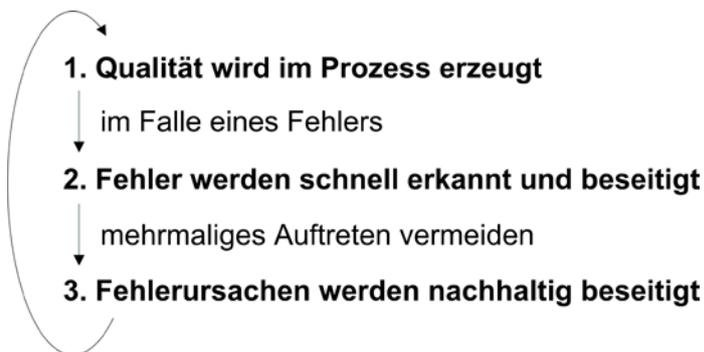


Abb. 31: Drei Prinzipien zur Erreichung robuster Prozesse²⁸⁶

Die Richtlinie VDI 2871 beschreibt in seinen **Gestaltungsprinzipien die Verbesserungskultur** folgendermaßen: ²⁸⁷

„Die Verbesserungskultur umschreibt das ständige Streben nach Verbesserung oder gar Perfektion und ist ein elementares Gestaltungsprinzip der Führung in GPS²⁸⁸. [...] Die Verbesserungskultur ist entscheidend für die Nachhaltigkeit der GPS-Implementierung. Probleme und Fehler werden als Herausforderung gesehen und unterstützen den Lernprozess der Mitarbeiter. Grundsätzlich sollten Führungskräfte in GPS ständig dazu auffordern, die vermeintlich perfekten Prozesse zu hinterfragen und zu verbessern. [...] Es ist Aufgabe der Führungskräfte, die Ideen der Mitarbeiter weiterzuentwickeln oder Probleme zu erkennen.“

²⁸⁴ Vgl. Womack & Jones, 2013, S.111.

²⁸⁵ Vgl. Scholz et al., 2003, S.63.

Auch eine angepasste Fehlerbaumanalyse nach DIN EN 61025 kann in diesem Fall hilfreich sein. Hierbei werden alle Teilsysteme auf dem Kritischen Weg ermittelt, deren Ausfall zum Ausfall des Gesamtsystems führen könnte. Vgl. DIN EN 61025, S.5 ff.

²⁸⁶ Scholz et al., 2003, S.63.

²⁸⁷ VDI, 2017, S.7.

²⁸⁸ Ganzheitliche Produktionssysteme.

5.4 Theory of Constraints

Die im Folgenden dargestellte „**Theory of Constraints**“ (TOC), welche auf Deutsch die „**Engpasstheorie**“ oder auch Durchsatz-Management genannt wird, ist eine Möglichkeit, um die Produktion im Sinne der Lean-Prinzipien so verschwendungsarm wie möglich zu gestalten. Mit Hilfe der TOC werden „Zug“, „Fluss“ und „Takt“ zusammen genutzt, um einen kontinuierlichen Produktionsfluss zu generieren, Verschwendungen zu vermeiden und die Wertschöpfung zu optimieren.

Die Grundidee der TOC stammt aus *Eliyahu Goldratts* Bestseller *The Goal*²⁸⁹ (Das Ziel). Die Theorie stellt sinnvolle Thesen und Vorgehen für das Management von Prozessen innerhalb eines Produktionsbetriebes dar und schafft ein Verständnis für den Einsatz von Engpässen und die Durchführung von Ablaufveränderungen. Die TOC dient als Ausgangspunkt verschiedener Methoden in den Bereichen Projektmanagement, Operations Research oder Produktionssteuerung, wie z.B. dem Critical-Chain-Management.

Da die Kritischer-Weg-Methode, welche in der Bauablauf- bzw. Terminplanung verwendet wird, auf der Idee der TOC basiert, erfolgt eine Adaption der TOC in Form des Leitprozesses im Prozessmodell siehe 3.3.

Die folgenden Methoden sind aus der TOC ableitbar und können unabhängig voneinander oder in Kombination verwendet werden, um die Leistungsfähigkeit eines Systems zu optimieren.²⁹⁰

- Process of Ongoing Improvement (POOGI) / Verbesserungskreislauf
- Drum-Buffer-Rope (DBR) / „Trommel-Puffer-Seil“

5.4.1 Grundlagen und Ursprung der TOC

In der TOC wird beschrieben, dass in einem System mit einer bestimmten Anzahl an Ereignissen ($n > 2$) (aufeinanderfolgend und parallelverlaufend) der Durchsatz von mindestens einem der Ereignisse bestimmt wird.²⁹¹

Definition Engpass

*Einen Engpass ist diejenige Fertigungseinheit (auch (Teil-)Prozess), deren Kapazität gleich oder geringer ist als der darauf entfallende Bedarf (auch Arbeitsmenge).*²⁹²

In der Literatur wird der Engpass bildlich als „**Bottleneck**“ (**Flaschenhals**) oder auch als „capacity-constrained resource“ (CCR, Kapazitätsbegrenzende Ressource) bzw. als „non-instant availability“ (NIA, Nicht sofort verfügbare Ressource) bezeichnet.²⁹³

²⁸⁹ Goldratt, 2004.

²⁹⁰ Burrows, 2015, S.99.

²⁹¹ Eigene Schlussfolgerung in Anlehnung an Goldratt, 2004.

²⁹² Vgl. Goldratt, 2004, S.157.

²⁹³ Vgl. Burrows, 2015, S.100.

Als **Beispiele** für den **Bauablauf** betreffende Engpässe nennt *Ballard* folgende: ²⁹⁴

- Verträge, Entwürfe und Vorlagen
- Materialien und Ausrüstung
- Arbeitsvoraussetzungen
- Arbeit
- Platz
- Inspektionen
- Genehmigungen und Zulassungen.

Hauptziel jedes Produktionsbetriebes ist es, nach dem Wirtschaftlichkeitsprinzip zu handeln, also Geld zu verdienen, wobei jegliche Tätigkeiten Mittel darstellen, um dieses Ziel zu erreichen. *Goldratt* beschreibt, dass dieses Ziel mithilfe der drei Variablen (Kennzahlen) Durchsatz, Bestände und Betriebskosten erreicht werden kann. ²⁹⁵

Der **Durchsatz** ist „die Geldmenge pro Zeiteinheit, die von dem System durch Verkäufe verdient wird.“ ²⁹⁶

Die **Bestände** sind „all das Geld, das in das System für den Ankauf von Dingen investiert wurde, die zum Verkauf gedacht sind.“ ²⁹⁷

Die **Betriebskosten** sind „all jenes Geld, das das System dafür ausgibt, Bestände in Durchsatz umzuwandeln.“ ²⁹⁸

Die drei Kennzahlen sind voneinander abhängig, weshalb gemäß des „magischen Dreiecks“ des Projektmanagements ²⁹⁹ nicht die Verbesserung der einzelnen Kennzahlen für sich angestrebt werden soll. „Das Ziel besteht darin, die Betriebskosten zu senken, die Bestände zu verringern und gleichzeitig den Durchsatz zu erhöhen.“ ³⁰⁰

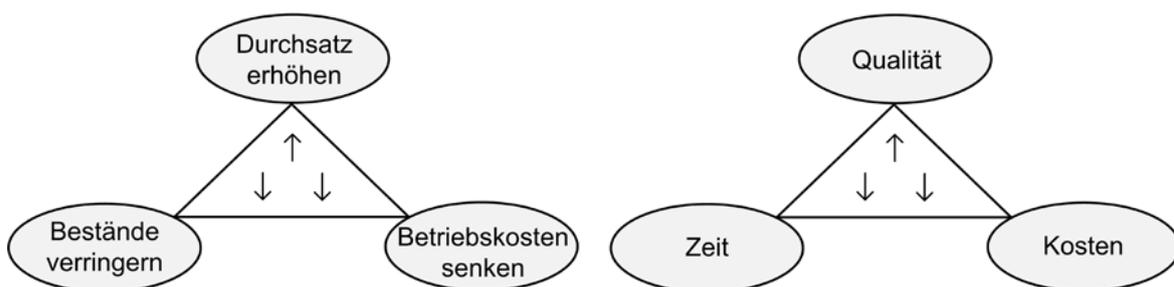


Abb. 32: Wirtschaftlichkeitskennzahlen und Magisches Projektmanagement Dreieck ³⁰¹

²⁹⁴ Ballard, 2000 (2), S.3-9.

²⁹⁵ Vgl. Goldratt, 2004, S.71 f.

²⁹⁶ Ebenda, S.72.

²⁹⁷ Ebenda, S.73.

²⁹⁸ Ebenda, S.73.

²⁹⁹ Vgl. Fischer, 2008, S.25. Wird eine Ecke des Dreiecks verschoben, so verschiebt sich das Verhältnis der Seiten entsprechend zueinander.

³⁰⁰ Goldratt, 2004, S.101.

³⁰¹ Eigene Darstellung anhand der Definitionen aus Goldratt, 2004, S.72 f. und in Anlehnung an Fischer, 2008, S.25.

Es sind zwei Gegebenheiten bei der Steuerung der drei Kennzahlen zu beachten, welche bei jeder Prozesskette - wie es ein Bauablauf ist - anzutreffen sind:³⁰²

1. **Abhängige Ereignisse:** Ein oder mehrere Ereignis(se) müssen ablaufen, ehe ein anderes beginnen kann. Das darauffolgende Ereignis hängt also von dem bzw. den vorhergehenden ab. Die Abfolge abhängiger Ereignisse wird Kritischer Weg genannt.
2. **Statistische Fluktuationen:** Einige Arten von Informationen können genau bestimmt werden. Andere lassen sich nicht bestimmen und können sich von einem Augenblick zum anderen ändern.

Für das Verständnis der zweiten Gegebenheit wird die Verwendung des Begriffes Fluktuation kurz erläutert. Die folgenden Definitionen zeigen, dass die Begriffe Fluktuation³⁰³, Schwankung bzw. Varianz eine (kurzzeitige oder andauernde) Veränderung (Wechsel) von Gegebenheiten und Zuständen bezeichnen. Diese sind je nach betrachteter Situation natürlich und lassen sich nur eingeschränkt beeinflussen³⁰⁴.

Stochastischer Prozess

„Ein stochastischer Prozess auf einem Maßraum $(\Omega, \mathcal{E}, \mathbb{P})$ ³⁰⁵ ist eine Menge $(X_t)_{t \in T}$ von Zufallsvariablen. Das „Prozess“-hafte drückt sich durch die Indexmenge t , zur Interpretation der Zeitpunkte aus.“³⁰⁶

Varianz (mathematisch)

In der Mathematik bezeichnet die Varianz die Streuung einer Stichprobe um den Mittelwert. Sie wird definiert als die mittlere quadratische Abweichung einer reellen Zufallsvariablen von ihrem Erwartungswert.³⁰⁷

Prozess-Fluktuation / -Schwankung / -Varianz

Die Abweichung eines Prozesses von der Norm bezogen auf die Indexmenge t (Zeitpunkte), wird als Fluktuation, Schwankung oder Varianz dieses stochastischen Prozesses bezeichnet.³⁰⁸

Beispiele für Indexmenge t als Zeitpunkte:³⁰⁹

- Wie viele Rohre sind bis zur Zeit t eingebaut?
- Wie hoch sind die Kosten für Verzögerungen am t -ten Tag?
- Bei welchem Tunnelmeter befindet sich der Vortrieb zur Zeit t ?

Durch die erläuterten Gegebenheiten, die bei der Steuerung der Kennzahlen Durchsatz, Bestände und Betriebskosten zu beachten sind, wird der mögliche Nutzen der TOC für den

³⁰² Vgl. Goldratt, 2004, S.101 f.

³⁰³ Lateinisch *fluctuare* „hin und her schwanken.“

³⁰⁴ Fluktuationen des Luftdrucks oder des Regenniederschlags sind beispielsweise nicht zu beeinflussen.

³⁰⁵ Behrends, 2013 (1), S.1: „Das Tripel $(\Omega, \mathcal{E}, \mathbb{P})$ ist ein Wahrscheinlichkeitsraum, wobei Ω eine Menge, \mathcal{E} eine σ -Algebra auf Ω und \mathbb{P} ein Wahrscheinlichkeitsmaß auf (Ω, \mathcal{E}) ist.“

³⁰⁶ Behrends, 2013 (1), S.7.

³⁰⁷ Vgl. Knoche et al., 2002, S.36 und vgl. Behrends, 2013 (2), S.88.

³⁰⁸ Vgl. Bauer, 2007, S.753 und Fiedler, 2018, S.18.

³⁰⁹ Beispiele in Anlehnung an Behrends, 2013, S.7.

Baubereich deutlich (vgl. die in Kapitel 2.2.4 beschriebenen Unsicherheiten im Bauwesen). Nahezu jedes Bauteil bzw. jede Teilleistung ist von vorgelagerten Leistungen abhängig und die Leistungserbringung (Prozessoutput) kann größtenteils als probabilistisch angesehen werden. Die im Folgenden erläuterten Methoden zur Engpasserkennung, -steuerung und -nutzung werden aus diesem Grund bezüglich ihres Nutzens für das Prozessmodell hin untersucht.

5.4.2 Methoden der TOC

Process of Ongoing Improvement (POOGI) / Verbesserungskreislauf

Der Verbesserungskreislauf *POOGI* besteht aus vier Fokussierungsschritten und wird durch den fünften Schritt wieder zu seinem Anfang geführt.³¹⁰

1. Identifizierung des Engpasses
→ Suche nach das System beschränkenden Faktoren
2. Volle Auslastung des Engpasses
→ darf nie „leer laufen“ (immer Arbeitsvorrat)
→ Entlastung von allen Arbeiten die er nicht ausführen muss
3. Unterordnung aller Maßnahmen an den Auslastungsentscheidungen
→ Unterstützungsprozesse am Engpass ausrichten
4. Engpass beheben
→ mit 2. und 3.
5. Wiederholung der Schritte 1.-4.

Diese Methode ist im Vergleich zum Zug-Prinzip aus Kapitel 5.3.5 zu sehen. Auch wenn die Kapazität für ein höheres Output vorhanden ist, wird dieses nicht produziert, da dieses höhere Output nicht angefordert („gezogen“) wird. Um die Sinnhaftigkeit dieser fünf Schritte zu erhöhen, fügt *Burrows* diesen einen weiteren, vorgelagerten Schritt 0 hinzu, welcher mit dem Wert-Prinzip (vgl. Kapitel 5.3.1) gleichzusetzen ist.³¹¹

0. Definiere das Ziel oder den Zweck des Systems.

Dieser Schritt 0 ist für die Bauproduktion bedeutsam, da mit diesem für jeden Prozess die Frage nach dem tatsächlichen Prozessziel („großes Ganzes“) beantwortet werden kann.

Beispiel

Zwei Prozessketten (A und B) laufen nach ihrer jeweiligen Fertigstellung zu einem nachfolgenden Prozess (C) zusammen. I.d.R. sind beide Prozessketten für sich betrachtet so schnell wie möglich zu bearbeiten und der Durchsatz soll größtmöglich sein.

Kann jedoch der nachfolgende Prozess (C) erst beginnen, sobald beide Prozessketten fertig sind und dauert eine der beiden Prozessketten (A) länger, so kann es sinnvoll (bspw. ressourcenschonend) sein, den Durchsatz der schnelleren Prozesskette (B) der langsameren (A) anzupassen. Der eigentliche Engpass (bzgl. des Durchsatzes) würde in einem solchen Fall außerhalb des betrachteten Prozesses (B) liegen (nämlich auf der Seite der zweiten Prozesskette (A)) und eine Bemühung zur möglichst schnellen Bearbeitung ist als

³¹⁰ Burrows, 2015, S.100.

³¹¹ Ebenda, S.101.

Verschwendung zu betrachten. Dieser Gedanke folgt der Methode der Harmonisierung (Produktionsnivellierung, Heijunka, siehe Kapitel 5.2.3).

Eine größere Bedeutung kann dieser Schritt bekommen, wenn der Durchsatz nicht das oberste Ziel ist. Ist beispielsweise das Ziel die Risikominimierung und die Vermeidung von Mängeln, auch unter Inkaufnahme höherer Bearbeitungszeiten, dann wird sich der Fokus innerhalb der fünf Schritte von der Zeit zur Qualität (= Mangelvermeidung, Risikominimierung) verschieben.

Drum-Buffer-Rope (DBR) / “Trommel-Puffer-Seil”

Das *Drum-Buffer-Rope System (DBR)* - das *Trommel-Puffer-Seil System* - wendet die zwei Lean-Methoden Takt (5.3.4) und Zug (Pull) (5.3.5) auf die die POOGI-Methode an. Das DBR kann als das Ablaufplanungssystem der TOC mit speziellem Fokus auf die Ablaufplanung des Engpasses bezeichnet werden.³¹²

Die drei Bestandteile der Methode sind Drum (Trommel), Buffer (Puffer) und Rope (Seil):

1. Drum = Trommel

Die Trommel stellt den Engpass bzw. den durch den Engpass bestimmten Arbeitsplan für die Produktion dar. Da die Kapazität des Engpasses die maximale Kapazität des Systems bestimmt, gibt die Trommel den Takt vor. Dieser Takt ist so zu wählen, dass der Engpass immer mit hoher, aber nachhaltiger Auslastung beschäftigt ist (siehe POOGI, Schritt 2).³¹³

2. Buffer = Puffer

Ein Puffer stellt die Dauer dar, welche es jeder Arbeit erlaubt, zum richtigen Zeitpunkt durch das System gewandert zu sein, um die maximale Kapazität des Systems voll auszunutzen. Um dies zu erreichen, wird ein Buffer-Management (siehe POOGI, Schritt 3) und eine Unterteilung der Buffer / Puffer vorgenommen:³¹⁴

- Teilprozesse³¹⁵ werden auf dem Weg zum Engpass beobachtet.
- Je nach verbrauchtem Buffer (Pufferzeit), wird den Teilprozessen jeweils ein Status zugewiesen (rot, gelb, grün) und sie werden nach ihrer Dringlichkeit priorisiert.

Dabei werden drei Buffer / Puffer unterschieden³¹⁶:

1. **Constraint Buffer** (Engpasspuffer³¹⁷): Ein für jeden Einzelfall zu bestimmender³¹⁸ Ressourcenvorrat stellt sicher, dass der Ablauf des Engpasses geschützt ist, der Engpass nie leer läuft und maximal ausgenutzt wird (siehe POOGI, Schritt 2).
2. **Assembly Buffer** (Zusammenführungspuffer³¹⁷): Puffer enthält Teile (Teilprodukte, Teilprozesse), welche mit Engpassteilen (-prozessen) zusammengeführt werden. Diese werden nur bei Zusammenführungen von Engpassteilen³¹⁹ und Nicht-

³¹² Vgl. Pandit, 2016, S.15.

³¹³ Vgl. Burrows, 2015, S.101.

³¹⁴ Vgl. ebenda, S.101.

³¹⁵ Auch Teilarbeit oder Zwischenprodukt.

³¹⁶ Vgl. Pandit, 2016, S.17.

³¹⁷ Jeweils eigene freie Übersetzung.

³¹⁸ Beispiel Rohrvortrieb: Es sind mindestens so viele Rohre vorzuhalten, dass die Menge für den Zeitraum (bei optimaler Vortriebsgeschwindigkeit) bis zur nächsten Lieferung ausreicht.

³¹⁹ Capacity Constraint Resource, CCR.

Engassteilen eingesetzt. Mit diesem Puffer soll sichergestellt werden, dass Engassteile sofort verarbeitet werden können und kein Stau am Engpass entsteht.

3. **Shipping Buffer** (Fertigstellungspuffer³¹⁷): Puffer enthält fertige Produkte, welche zu einem vom Kunden bestimmten Zeitpunkt an diesen gehen, um das Lieferdatum sicherzustellen.

3. **Rope = Seil**

Das Seil ist die Verbindung der Puffer mit der Eingabestelle der Ressourcen, also das Kommunikationsmittel des Gesamtprozesses. Der Engpasspuffer gibt das Signal an das System, entsprechend dem der Arbeitsplan gestaltet wird. Es handelt sich hierbei also um ein Pull-System (siehe Kapitel 5.3.5), bei welchem erst zu einem bestimmten Zustand (z.B. Unterschreiten der Menge des Engpasspuffers) Arbeit in das System gegeben wird.

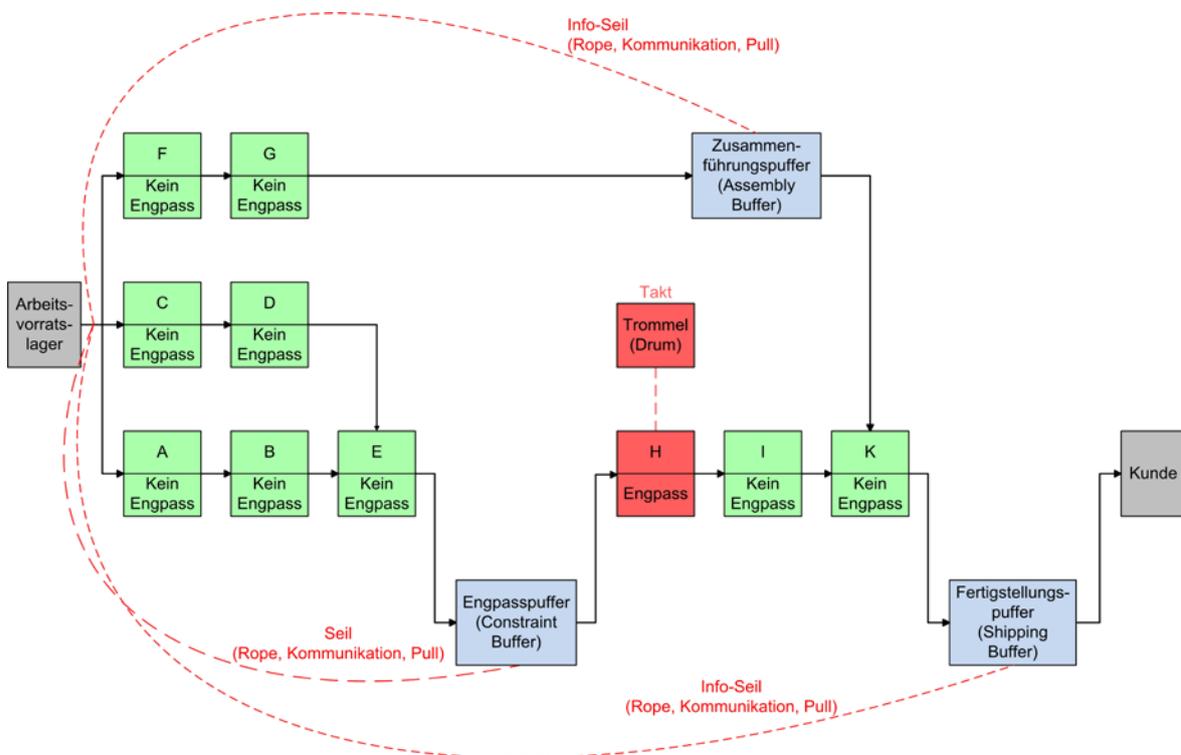


Abb. 33: Drum-Buffer-Rope System ³²⁰

Drum-Buffer-Rope System in der Netzplantechnik

Das in der obigen Abbildung dargestellte DBR-System lässt sich gut mit der Netzplantechnik vergleichen. Mit dieser lassen sich komplexe Ablaufstrukturen bzgl. der Abhängigkeiten der Prozesse abbilden. Werden den durch die Kanten / Linien (= Anordnungsbeziehungen) verbundenen Prozessen (= Knoten bzw. Punkte) bestimmte Informationen hinzugefügt, können die Vorteile des DBR-Systems in einem Netzplan genutzt werden. Hierzu sind den Vorgangsknoten allerdings neben den „üblichen“ (z.B. Vorgangs-Nr., Benennung / Beschreibung, Dauer, Start- und Endtermin, Anordnungsbeziehung) zusätzliche Informationen bzgl. der Puffer hinzuzufügen. Diese Informationen sind stetig zu aktualisieren, um bspw. zu erkennen, dass ein Puffer einen erlaubten Minimalwert erreicht hat.

³²⁰ Eigene Darstellung nach Burrows, 2015, S.104 und Pandit, 2016, S.17.

Wert-Box 09: Einordnung in die Themenstellung und Wert der Engpasstheorie für das Prozessmodell

Die Bauproduktion und somit auch der Tunnelvortrieb stellen Gesamtsysteme dar, die aus „Abhängigen Ereignissen“, welche durch „Statistische Fluktuationen“ beeinflusst werden, bestehen. Zudem hat jede Bauproduktion ebenfalls das von *Goldratt* beschriebene Ziel der Betriebskostensenkung bei gleichzeitiger Verringerung der Bestände und der Erhöhung des Durchsatzes.

Die Definition des Leitprozesses für das Prozessmodell kann somit in enge Verbindung mit der Engpasstheorie gesetzt werden. Ebenso, wie ein Engpass nach der zweiten POOGI-Regel niemals „leer laufen“ darf, so ist auch das Ziel des Prozessmodell, dass die DWEP so oft und so lange wie möglich ausgeführt werden können. Ist die Ausführung eines DWEP jedoch nicht möglich, so ist der Prozess, der die Ausführung eines DWEP verhindert, der Leitprozess. Der Engpass verschiebt sich also kurzfristig und ist dann entweder ein IWEP oder die Behebung einer Störung, also ein NWEP. Wie in der Engpasstheorie auch wird mit dem Prozessmodell der ganzheitliche Ansatz gewählt. Einzelprozessoptima sind nur sinnvoll, wenn sie sich auch positiv auf die Gesamtprozessproduktivität auswirken. Ist dies nicht der Fall, ist es möglich, dass sie bspw. aufgrund des Ressourcenverbrauchs die Kapazität des LP (= Engpass) mindern und somit als Verschwendung anzusehen sind.

Auch die Berücksichtigung der Puffer ist im Prozessmodell Beachtung zu schenken. Ein Parallelprozess darf bspw. nie die Dauer des Leitprozesses überschreiten, da dies der Forderung der Priorisierung des Leitprozesses entgegenstehen würde. Es sind deshalb Parallelprozesse mit einem gewissen Zeitpuffer (Engpasspuffer) zu wählen. Die Berücksichtigung eines Zusammenführungspuffers kann anhand der Fälligkeiten der Prozesse geschehen. Hierzu ist ein Abgleich des aktuellen Baustellenzustandes mit der zyklischen Fälligkeit eines Prozesses und dessen letzter Ausführung notwendig.

5.5 Lean Construction

Seit den 1990er-Jahren werden die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Grundsätze des Lean Thinking auf das Bauwesen übertragen, daran angepasst, weitere speziell auf die Baubranche ausgerichtete Methoden entwickelt und die Gesamtheit dieser Maßnahmen als Lean Construction³²¹ bezeichnet.³²² Eine einfache Übertragung der Lean Prinzipien und Methoden auf Bauprojekte ist aufgrund der Unterschiede zur stationären Industrie nicht möglich. Wie im Kapitel 2 dargestellt, sind Bauprojekte als komplexe Einzel-fertigungen zu sehen. Jedes Projekt unterliegt neuen Randbedingungen wie beispielsweise den Witterungsbedingungen oder den Örtlichkeiten. Die Ziele des Lean Construction sind jedoch mit denen der industriellen Produktion vergleichbar. Die Vermeidung von Verschwendung, die kontinuierliche Verbesserung und eine hohe Kundenzufriedenheit sollen durch die Reduzierung der Stillstands-, Warte- und Lagerzeiten, der Bestände und des Aufwands für die Mängelbehebung sowie durch die Erhöhung der Kommunikation und der Liefersicherheit der Planunterlagen erreicht werden. Um diese Ziele zu erreichen, müssen die passenden Bausteine aus den verschiedenen Methoden für das jeweilige Projekt gefunden, auf allen Unternehmensebenen angepasst eingeführt und konsequent umgesetzt werden.³²³

Die mit dem Lean Construction verfolgten Ziele, können folgendermaßen zusammengefasst werden:³²⁴

Erhöhung/Verbesserung:

- Kundenzufriedenheit
- Produktivität
- Prozessstabilität
- Qualität
- Termintreue
- Transparenz
- Kommunikation
- Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten
- Standardisierung von Arbeitsweisen
- Lerneffekte
- Attraktivität der Branche für Nachwuchskräfte
- Nachhaltigkeit

³²¹ Auch Lean Construction Management (LCM) oder Lean Management im Bauwesen (LMB). Da aus der Herleitung bereits klar geworden ist, dass es sich bei Lean um eine zielgerichtete und nach ökonomischen Prinzipien ausgerichtete Handlungsweise, also „Management“ handelt und da der Begriff „Lean Construction“ international für die Übertragung der Lean-Prinzipien auf das Bauwesen verwendet wird, wird auch in dieser Arbeit ausschließlich dieser Begriff verwendet.

³²² Vgl. Haghsheno, 2018, S.XV.

³²³ Vgl. Fiedler et al., 2018, S.96.

³²⁴ Erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Verringerung/Abschaffung:

- Verschwendungen
- Kosten
- Mängel / Nacharbeiten
- Bestände
- Wartezeiten
- Streitigkeiten / Gerichtsverfahren
- Leistungsdruck
- Termindruck
- Schlechtes öffentliches Ansehen

In den folgenden Abschnitten werden die Kundendefinition, welche im Bauwesen bzw. im Lean Construction eine wichtige Rolle spielt, sowie verschiedene, bereits entwickelte und angewendete Methoden des Lean Construction dargestellt.

5.5.1 Kundendefinition: Prozesskunde

Wie im Kapitel zu Lean Thinking dargestellt, ist die eindeutige Definition des Wertes für den Kunden der Ausgangspunkt, um die weiteren Lean-Prinzipien erfolgreich umsetzen zu können. Es kann beobachtet werden, dass beträchtliche Informationsdefizite über die Kundenumwelt und die Probleme sowie Wünsche des Kunden bestehen.³²⁵ Insbesondere im Bauwesen ist die Definition des Kunden selbst nicht trivial. Aufgrund der langen Herstellzeit, der langen Nutzungszeit, einer möglichen Umnutzung oder verschiedener gleichzeitiger Nutzer ist schon die Bestimmung des Endkunden schwierig.³²⁶

Durch die Konzentration auf die Prozesse bezieht sich der Begriff des Kunden nicht nur auf den Endkunden. Das interne Wertschöpfungsnetzwerk ist auf das Kundenwert-Prinzip zu übertragen. Dabei ist die Orientierung am Kunden als die komplementäre Funktion zur Prozessorientierung zu sehen, wenn diese gemäß dem Pull-Prinzip nach dem Bedarf gesteuert wird.³²⁷ Sämtliche nachfolgenden Prozesse, Gewerke und Leistungen können als Prozesskunden mit ihren individuellen Anforderungen angesehen werden.³²⁸ Ohne diese Sichtweise eines internen Kunden und somit eines Kunden-Lieferanten-Prinzips ist eine Berücksichtigung des Pull-Prinzips und damit des Fluss-Prinzips im Bauwesen nicht möglich. Für jeden Prozess sind Informationen bzgl. wann, was und wie für den Kunden zu leisten ist, bereitzustellen.³²⁹ Jeder Prozess hat einen Kunden und einen Hersteller.

³²⁵ Vgl. Berekoven, 1986, S.71 f.

³²⁶ Vgl. Fiedler, 2018, S.98.

³²⁷ Vgl. Weiß et al., 2015, S.63.

³²⁸ Vgl. Hickethier, 2015, S.51.

³²⁹ Vgl. Rother & Shook, 2011, S.25.

5.5.2 Lean Construction Methoden

Die Übertragung der Grundsätze des Lean Thinking auf das Bauwesen ist nur möglich, indem diese angepasst und weitere speziell auf die Baubranche ausgerichtete Methoden entwickelt werden. Verschiedene erste Ansätze hierzu können nach *Haghsheno et al.* grob drei Strömungen zugeordnet werden:³³⁰

- Gestaltung und Steuerung von Produktionssystemen (insbesondere Taktplanung),
- Kooperative Arbeitsplanung,
- Integrierte Form der Projektabwicklung.

Ein weiterer Ansatz beschäftigt sich mit dem Verschieben der Bauprozesse in die industrielle Fertigung, indem der Einsatz von Fertigteilen erhöht wird.

Gestaltung und Steuerung - Übertragung der Lean Prinzipien

Die Bauprozesssysteme können nach den vier in Kapitel 5.3 beschriebenen Lean Prinzipien **Fluss, Takt, Pull** und Streben nach **Perfektion** gestaltet werden. Hierbei ist eine sinnvolle Übertragung der Taktplanung und -steuerung auf die Bauindustrie nur unter Berücksichtigung der Unterschiede zur stationären Industrie möglich. Die Produkte fließen in der stationären Industrie durch die Produktion, bei einem Bauprojekt hingegen bewegen sich die einzelnen Gewerke durch das örtlich gebundene, zu erstellende Bauwerk. Hierbei hat sich die Metapher des „**Gewerkezuges**“ mit seinen „Waggons“, der von Abschnitt zu Abschnitt fährt (im Sinne von fließt bzw. gezogen wird), etabliert. Als weiterer Unterschied zwischen den Industrien wird auf der Makroebene die **Losgröße** gesehen. So wird z.B. in der Automobilindustrie eine große Menge Fahrzeuge hergestellt, wobei jede Arbeitsstation mit (mehr oder weniger) jedem neuen, zu bearbeitenden Teil an einem neuen Fahrzeug arbeitet. Bei einem Bauprojekt wird dagegen nur ein Produkt - das Bauwerk - bearbeitet und die Losgröße ist „eins“. Jedoch werden auf der Mikroebene verschiedene, sich wiederholende Arbeitsschritte bzw. Elemente (z.B. Wände, Platten oder Zimmer) erkennbar, wodurch sich die Anzahl der Lose erhöht und die Größe der Lose verkleinert.³³¹

In der Bauproduktionsplanung werden in einem ersten Schritt die Reihenfolge und Abhängigkeiten der Gewerke festgelegt, damit ein **Arbeitsfluss** entstehen kann. In einem zweiten Schritt wird der Produktionsplan so in Taktzeiten eingeteilt, dass die Gewerke gemäß ihrer Kapazitäten die jeweiligen Taktbereiche in einer gleichmäßigen Geschwindigkeit bearbeiten können. Mängel werden umgehend erkannt und behoben und durch die Analyse der Fehlerursachen werden die Prozesse sukzessiv stabiler.³³²

³³⁰ Haghsheno et al., 2015, S.141.

³³¹ Vgl. Friedrich et al., 2013, S.46 ff.

³³² Vgl. Haghsheno et al., 2015, S.142.

Ablauf der Taktplanung und Taktsteuerung

Der Bauablauf wird durch Schnittstellenprobleme, falsche Reihenfolge der Leistungserbringung, Verzögerungen von Planungsunterlagen, Lieferungen oder Beteiligten und Änderungen gestört.³³³ Um diese Probleme zu verringern, kann beispielsweise im Innenausbau die Taktplanung und Taktsteuerung eine gute Methode sein.³³⁴

Damit die dargestellten Probleme im klassischen Bauablauf reduziert werden können, müssen „die Abläufe auf der Baustelle strukturiert und stärker standardisiert werden.“³³⁵ Hierbei wird in einer Prozessanalyse im ersten Schritt das Bauprojekt in ähnliche Gebäudeteile gegliedert. Beispiele hierfür sind Treppenhäuser, die Fassade oder Aufenthaltsbereiche. Im zweiten Schritt werden für diese Gebäudeteile die „Wiederholelemente“ gesucht, z.B. ein Zimmer. Diese werden als Taktbereiche³³⁶ bezeichnet. In einem dritten Schritt werden für diese Taktbereiche die notwendigen Arbeitsschritte und damit die Gewerke und deren Reihenfolge ermittelt.³³⁷

Aufbauend auf dieser Prozessanalyse erfolgt die Taktplanung, welche ebenfalls in drei Schritte unterteilt wird. Im ersten Schritt werden die Massen der einzelnen Arbeitsschritte ermittelt und mit Aufwandswerten³³⁸ multipliziert. Daraus ergibt sich ein Arbeitsverteilungsdiagramm. In einem zweiten Schritt werden die einzelnen Arbeitsschritte in Arbeitspaketen zusammengefasst, deren Umfang anhand der vorgegebenen Taktzeit harmonisiert wird. Im dritten Schritt der Taktplanung wird ein getakteter Produktionsterminplan erstellt, welcher als Zeit-Ort-Diagramm dargestellt wird.³³⁹

Taktplanung und Taktsteuerung Linienbaustellen

Aufgrund der kurzzyklischen Wiederholung weniger Arbeitsschritte sind Linienbaustellen, wie sie im Straßen-, Schienen-, Tunnel- und Brückenbau zu finden sind, prädestiniert für eine Taktung. Im Brückenbau können das Taktschiebeverfahren und der Freivorbau mit Fertigteilsegmenten genannt werden. Im Rohrvortrieb wird der (vereinfacht gesehen) regelmäßige Wechsel zwischen Vortrieb und Rohreinbau von der möglichen Ausbruchsmenge bzw. der Rohrlänge vorgegeben. Wie im Kapitel 6.4 dargestellt wird, ist der Sprengvortrieb ebenfalls durch eine regelmäßige Abfolge der Schlüsselprozesse³⁴⁰ getaktet. Im Hochbau wird der Rohbau durch das Herstellungsverfahren bedingt getaktet. Der Takt ist hier erheblich von den Ressourcen, wie beispielsweise von der Anzahl an Schalungselementen oder vorproduzierten Fertigelementen, abhängig.³⁴¹

³³³ Vgl. Binninger & Wolfbeiß, 2018, S.163 ff.

³³⁴ Die im Folgenden dargestellten Methoden wurden bei dem Generalunternehmer „weisenburger bau gmbh“ aus Rastatt in verschiedenen Projekten angewendet und mit der Zeit verfeinert. Die Methoden werden von Dipl.-Ing. Marco Binninger und Dipl.-Ing. Oliver Wolfbeiß in Fiedler, 2018, „Lean Construction - Das Managementhandbuch“, beschrieben. Sie konstatieren in diesem Beitrag jedoch auch, dass „durch das erfolgreiche Pilotprojekt, Schulungen und Mitnahme der Mitarbeiter [...] ein Change Management-Prozess angestoßen [...] wurde]. Dennoch kam es bei den 100 Projekten nicht immer zur erfolgreichen Lean Implementierung“ (S.176).

³³⁵ Fiedler et. al, 2018, S.164.

³³⁶ Eigene Schlussfolgerung.

³³⁷ Vgl. Binninger & Wolfbeiß, 2018, S.166.

³³⁸ Erfahrungswerte aus der Literatur oder eigene Messwerte.

³³⁹ Vgl. Binninger & Wolfbeiß, 2018, S.167.

³⁴⁰ Siehe Abb. 40.

³⁴¹ Vgl. Binninger & Wolfbeiß, 2018, S.165.

Kooperative Planung - Last Planner® System (LPS)

Ein Projekt wird im *PMBOK® Guide*³⁴² als „eine zeitlich begrenzte Unternehmung zur Herstellung eines einzigartigen Produkts, Services oder Resultats“³⁴³ definiert. Je nach Größe eines Bauprojektes ist eine bestimmte Anzahl an Personen bzw. Unternehmen, zu bestimmten Zeiten und an bestimmten Orten beteiligt. Je größer ein Bauprojekt ist, desto komplexer wird es, was zu Problemen, wie nicht eingehaltener Zeit- oder Kostenplanungen führen kann. Eine Möglichkeit, die Planung und Steuerung der Bauprozesse zu verbessern, ist das *Last Planner® System*. Dieses wurde seit den 80er Jahren von *Ballard* und *Howell* als eine Methodik zur Produktions- und Terminsteuerung mit dem Ziel entwickelt, die Vorhersagbarkeit und die Verlässlichkeit der Prozesse in der Bauproduktion zu erhöhen.³⁴⁴ *Ballard* beobachtete, dass nur etwa 50 % der in einem wöchentlichen Baustellenarbeitsplan enthaltenen Aufgaben tatsächlich erledigt wurden. Er begann an der Effektivität von stark detaillierten Plänen, welche weit im Voraus erstellt werden, zu zweifeln.³⁴⁵ *Ballard* definiert den „Last Planner“ folgendermaßen:

„Die Planung in einem Unternehmen tendiert dazu, den Fokus auf übergeordnete Ziele und Hindernisse zu richten, welche das gesamte Projekt beherrschen. Diese Ziele bestimmen die Planung der Prozesse auf den unteren Ebenen, welche die Grundlage für die Erreichung der Ziele darstellen. Letztlich bestimmt jemand (Person oder Gruppe) welche physische, bestimmte Arbeit am nächsten Tag ausgeführt wird. Diese Art von Plan wird als „Auftrag“ bezeichnet. Diese Pläne sind einzigartig, da sie spezifische Arbeit vorantreiben, anstatt der Produktion anderer Pläne. Die Person oder Gruppe, welche die Aufträge produziert wird „Last Planner“ genannt.“³⁴⁶

Durch das LPS soll die Kommunikation der Projektteilnehmer erhöht werden und daraus ein Netzwerk aus Zusagen entstehen.³⁴⁷ Durch die Zusagen an die anderen Projektteilnehmer soll das Bemühen zur Einhaltung der Vereinbarungen gesteigert werden, eine „Team-Atmosphäre“ entstehen und somit Probleme kooperative gelöst werden.³⁴⁸ Diese kooperative Phasenplanung und die Feinplanung durch die Umkehr der Ausführung stellen die größten Unterschiede zur traditionellen Bauprojektplanung dar.³⁴⁹

Die Kontrolle ist im LPS pro-aktiv statt reaktiv. Missstände sollen nicht reaktiv „aufgefangen“ werden, sobald etwas schief gelaufen ist, sondern es soll sichergestellt werden, dass die Aufgaben zu dem Zeitpunkt erledigt werden können, zu dem sie geplant wurden.³⁵⁰

³⁴² A guide to the project management body of knowledge.

³⁴³ PMI, 2008, S.5.

³⁴⁴ Vgl. Mossmann, 2013, S.2.

³⁴⁵ Vgl. Ballard, 2016, S.3.

³⁴⁶ Zitat übersetzt aus Ballard, 2000 (2), S.3-1, Ballard verweist auf Howell & Ballard, 1994, wobei jedoch diese Zusammenfassung von Ballard in Ballard, 2000 (2) für das Verständnis als besser geeignet scheint. Originalzitat: „Planning high in the organization tends to focus on global objectives and constraints, governing the entire project. These objectives drive lower level planning processes that specify means for achieving those ends. Ultimately, someone (individual or group) decides what physical, specific work will be done tomorrow. That type of plans has been called "assignments". They are unique because they drive direct work rather than the production of other plans. The person or group that produces assignments is called the "Last Planner"“.

³⁴⁷ Vgl. Mossmann, 2013, S.4 und vgl. Schlabach, 2015, S.3.

³⁴⁸ Diese Ziele wurden von mir aus zahlreichen Gesprächen mit verschiedenen Anwendern des LPS und durch Informationen aus unterschiedlichen Fachzeitschriften und Büchern zusammengetragen, so wie ich sie verstanden habe.

³⁴⁹ Vgl. Hofacker, 2010, S.46.

³⁵⁰ Vgl. Mossmann, 2013, S.4.

In der traditionellen Projektplanung kann nach *Ballard* der Ablaufplan folgendermaßen vereinfacht werden. Der Ablaufplan stellt das Soll dar. Es wird festgelegt, welche Ressourcen für die Ausführung dieses Solls notwendig sind. Sind die Arbeiten ausgeführt, wird das Ist mit dem Soll verglichen und bei Abweichungen Gegenmaßnahmen ergriffen. Auf diese Weise entstehen weitere Unsicherheiten und Abweichungen vom nachfolgenden Soll.³⁵¹ Mit dem LPS soll hingegen sichergestellt werden, dass der zur Erstellung notwendige Prozess vor Aufnahme der Arbeiten von allen Direktbeteiligten verstanden und nachvollzogen wurde. Das LPS besteht aus fünf Phasen, wobei die einzelnen Phasen die Unsicherheiten integrieren, die durch langfristige Zusagen entstehen. Die Zusagen führen diese Unsicherheiten konsequent durch einen Vorschauprozess in eine abgesicherte Produktionsplanung über. In den Phasen eins bis vier wird die Planung immer detaillierter und in Phase fünf werden die vorherigen Phasen ausgewertet und Schlüsse für die zukünftige Planung gezogen. Die einzelnen Phasen entwickeln sich hierbei aus den jeweils vorherigen Phasen und sind nicht einzeln, sondern in ihrer Wirkung als Gesamtheit zu betrachten. Die vier Planungsphasen sind die Rahmenterminplanung, die kooperierende Phasenterminplanung, die Vorschauplanung und die Detailplanung. Die letzte Phase kann als Analysephase bezeichnet werden.³⁵²

Integrierte Projektabwicklung - LPDS und IPD

Das *Lean Project Delivery System*TM (LPDS) ist eine von *Ballard* entwickelte prozessorientierte Methode, welche im Gegensatz zur Trennung zwischen der Planung und Bauausführung einer konventionellen Projektabwicklung steht. Im LPDS wird ein Projekt in fünf Phasen unterteilt, welche nach einer einheitlichen und durchgängigen Struktur integriert betrachtet werden. Die Phasen sind die Konzeption bzw. Projektdefinition (Project Definition), die Prozess- und Produktplanung (Lean Design), die Lieferung (Lean Supply), die Ausführung (Lean Assembly) sowie die Nutzung (Use) des Bauwerks. Die einzelnen Phasen überlappen sich und sind rückgekoppelt, wodurch sowohl die Planer, externe Hersteller als auch die ausführenden Unternehmen enger zusammenarbeiten.³⁵³

Ein Vertragsmodell, welches diesen integrierten Ansatz berücksichtigt, ist das *Integrated Project Delivery* (IPD). Bei diesem werden Regeln bzgl. der Zusammenarbeit, der Führung des Projektes und der organisatorischen Gestaltung festgelegt. Für integrierte Projekte werden neue Formen von Verträgen, mit neuen Begrifflichkeiten und neuen Strukturen benötigt. Der Umfang und der Beginn der Mitarbeit, die Datenverfügbarkeit, die Risikoverteilung, wie auch die Vergütungsverteilung sind Aspekte, welche berücksichtigt werden müssen.³⁵⁴

Vorfertigung und Modularisierung

Die Prinzipien und Methoden der Vorfertigung und Modularisierung orientieren sich stark an der Lean Production. Hierbei werden die Bauprozesse in die industrielle Fertigung verschoben, indem der Einsatz von Fertigteilen erhöht wird. Die Wertschöpfungstiefe und die Komplexität der Baustellenproduktion werden auf diese Weise reduziert. Die Baustellentätigkeiten werden begrenzt auf die Montage vorgefertigter Elemente.³⁵⁵

³⁵¹ Vgl. Ballard, 2000 (2), S.3-1 f.

³⁵² Vgl. Mossmann, 2013, S.12 ff.

³⁵³ Vgl. Ballard, 2000 (1), S.1 ff.

³⁵⁴ Vgl. Sonntag und Hickethier, 2018, S.88 ff. und vgl. Darrinton und Lichtig, 2018, S.309 ff.

³⁵⁵ Vgl. Kitzmann und Brenk, 2018, S.86 und vgl. Kirsch, 2009, S.26 f.

5.6 Lean Construction im maschinellen Tunnelvortrieb

Bevor im nächsten Kapitel die Grundlagen des Tunnelbaus erläutert werden, wird zum Abschluss dieses Kapitels dargestellt, dass die Methoden von Lean Construction im Bereich des Tunnelbaus nicht unbekannt sind. Insbesondere Bauunternehmen, die in verschiedenen Baubereichen tätig sind, wenden die bereits bspw. im Wohnungsbau eingesetzten Lean Techniken zunehmend auch in ihrer Tunnelbauabteilung an. Im Folgenden sollen zwei Beispiele für erste Anwendungen von Lean Construction im Tunnelbau und die dabei verfolgten Ansätze gegeben werden.

5.6.1 Optimierung des Rohrwechsels bei Wayss & Freytag

Die Fa. *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG (W&F)*³⁵⁶ ist eine Tochterfirma der niederländischen *Royal BAM Group* und neben dem Tunnelbau in den Bereichen Ingenieurbau, Spezialtiefbau, Verkehrswegebau, Bauen im Bestand und Umwelttechnik tätig. Die *Royal BAM Group* zählt darüber hinaus den Schlüsselfertigen Hochbau zu ihren Kompetenzen. 2016 gründete die *Royal BAM Deutschland* ihre Lean Construction Abteilung. In 2015 hat *W&F* begonnen, die ersten Lean Methoden bei ihren Projekten zu implementieren.

Der Fokus lag dabei im Bereich des ersten Schrittes der Optimierung (siehe Kapitel 3.2). Es wurde eine Optimierung der einzelnen Prozesse angestrebt, im Speziellen eine Optimierung des DWEP Rohrwechsel. Hierbei konnte mit Lean Methoden der Rohreinbau im Schacht so optimiert werden, dass der Zeitbedarf für den Rohrwechsel um 30 % reduziert wurde.³⁵⁷

Die Rohrwechselzeit wurde auf drei Arten analysiert und optimiert. Erstens wurden die voneinander unabhängigen Prozessschritte parallelisiert, um den Kritischen Weg zu reduzieren. Zweitens wurden die Arbeitswege durch die Zuteilung von Kernarbeitsbereichen verkürzt und die Aufgaben optimiert, indem den Personen einzelne Arbeitsschritte klar zugeordnet wurden. Als dritte Maßnahme erfolgte die Optimierung der Anordnung des Baustellenequipments im Schacht.³⁵⁸

5.6.2 Lean Ansätze im konventionellen Tunnelbau bei Alfred Kunz Untertagebau

Die Fa. *Alfred Kunz Untertagebau (AKU)* wurde 1882 gegründet und ist eine Niederlassung der *August Reiners Bauunternehmung GmbH* aus Bremen.

AKU konnte durch eine konsequente Arbeitsvorbereitung und der Einbindung aller Beteiligten in unterschiedlichen Tunnelbauprojekten der konventionellen bergmännischen Bauweise erste Lean-Ansätze implementieren. Dabei konzentrierte sich *AKU* auf die Kalkulation und die Arbeitsvorbereitung, da die Untertage Arbeiten trotz steigendem Mechanisierungsgrad immer noch sehr lohnintensiv sind. Hierbei wurden die Prozesse der Vortriebsarbeiten, die einzelnen, ständig wiederkehrenden Arbeitsschritte analysiert und diese in Summe als Vortriebszyklus zusammengefasst. Somit lag auch bei der *AKU* die Konzentration auf den ersten beiden Schritten der Optimierung (siehe Kapitel 3.2).

³⁵⁶ Seit 1999 bestehen unter dem Namen Wayss & Freytag zwei Gesellschaften, die *BAM Deutschland AG* und die *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG*. Diese sind aus dem deutschen Bauunternehmen *Wayss & Freytag AG* hervorgegangen. Sie sind seit 2002 Tochtergesellschaften der *Royal BAM Group*, welche das größte niederländische Bauunternehmen ist.

³⁵⁷ Vgl. Korndörfer & Wittenbrink, 2018, S.5.

³⁵⁸ Vgl. Schaefer, 2016, S.10.

AKU fand drei Möglichkeiten heraus, um die Zeit eines Vortriebszyklus zu optimieren. Erstens wurde analysiert, dass die einzelnen Arbeitsschritte einen stark unterschiedlichen Personalbedarf aufweisen. Untersucht wurden hierbei die Arbeitsschritte eines Sprengvortriebs zum Ausbruch der Kalotte. Eine konsekutive Arbeitsfolge hätte aufgrund der inhomogenen Mannschaftsstärke einen sehr hohen Anteil an unproduktiven Stunden zur Folge (ca. 55 %), was dem Lean-Gedanken folgend als Verschwendung anzusehen ist. Die Prozessanalyse zeigte weiterhin, dass Arbeiten auch parallel ausgeführt werden können. Insbesondere die sogenannte Randarbeiten (Lutten vorbauen, Instandhaltung der Fahrwege oder Materialtransport u. a.) können in Leerlaufphasen ausgeführt werden. Durch konsequente Ausnutzung einer Parallelisierung der Arbeitsschritte konnte eine deutliche Verstärkung des Vortriebszyklus erreicht und unproduktive Zeiten um rund 50 % reduziert werden.³⁵⁹

Zweitens wurde der Takt durch den Einsatz von vorgefertigten Fugenelementen optimiert. Der Vorteil der Anwendung des Fugenabschaltsystems lag darin, dass ein aufwendiges Abschalen der Blockfugen einschließlich des Einbaus des Fugenbandes entfällt. Nun konnten mehrere aufeinanderfolgende Tunnelsohlen in einem Zug bewehrt und anschließend zusammen betoniert werden. Es kommt dadurch zu keinen Unterbrechungen bei der Bewehrungsverlegung. Lückenschlussbewehrungen werden überflüssig. Eine gezielte Auswahl der Betongüte erlaubte ein Befahren der neuen Abschnitte am Folgetag. Dadurch konnte der Bauablauf zur Herstellung der Tunnelsohlen kontinuierlich, ohne wesentliche Unterbrechungen, erfolgen. Die stationäre Vorfertigung reduziert zudem den Schalungsaufwand und den Aufwand zur Ausbildung der Fugenbewehrung.³⁵⁹

Als dritte Maßnahme wurden der Vortrieb und die Arbeiten an der Innenschale parallelisiert. Die Grundsatzidee sah vor, durch ein Vorziehen der Arbeiten an der Sohle der Innenschale unter zeitgleicher, ungestörter Weiterführung der Vortriebsarbeiten die Terminalsituation zu entspannen. Das Resultat sah eine Logistikunterstützung mit Hilfe einer überfahrbaren Sohlbrücke vor. Die hieraus entwickelte Konstruktion, welche im Gegensatz zu bis dato eingesetzten mobilen Brücken mittels Schreitwerkvorschub mit einer Geschwindigkeit von etwa 25 m/h vorgerückt werden konnte, überspannte mit einer freien Brückenlänge von 48 m insgesamt drei Arbeitsfelder in Blocklängen von jeweils 12,50 m, zuzüglich 10,50 m Arbeitsraum. Durch die freitragende Konstruktion entstand eine nahezu fabrikmäßige Einrichtung zur Herstellung der Innenschalensohlen (einschließlich Füllbetoneinbau). Das Vorfahren und Einrichten der mobilen Sohlbrücke erfolgen jeden zweiten Tag.³⁵⁹

³⁵⁹ Vgl. Engelhardt et al., 2018, S.3 ff.

6 Grundlagen Tunnelbau

Aufgrund seiner Komplexität ist der Tunnelbau ein sehr interessanter wie auch ein sehr komplizierter Fachbereich des Bauingenieurwesens. Auch aus diesem Grund sind viele verschiedene Spezialisten der unterschiedlichsten Fachbereiche für die Themen Statik, Massivbau, Geologie, Geomechanik, Maschinentechnik und Bauverfahrenstechnik involviert.³⁶⁰

Im ersten Unterkapitel wird der Bereich des Tunnelbaus im Allgemeinen mit den Begrifflichkeiten und den verschiedenen Verfahren dargestellt. Darauf folgend wird detaillierter der maschinelle Tunnelvortrieb und seine Verfahren vorgestellt, bevor der Spezialfall, für welchen das Prozessmodell in seiner ersten Form entwickelt wurde, der Rohrvortrieb im dritten Unterkapitel erläutert wird. Im vierten Unterkapitel wird eine weitere Vortriebsmethode, der Sprengvortrieb, kurz vorgestellt. Da das Prozessmodell auch auf andere Vortriebsarten adaptierbar sein soll, wird eine erste sinnhafte Modelldarstellung anhand des Sprengvortriebs im Kapitel 7 erfolgen, weshalb auch für diese Vortriebsart die Grundlagen darzulegen sind.

6.1 Tunnelbau

Der Tunnelbau unterscheidet sich von anderen Baukonstruktionen. Zum einen steht das Bauwerk in Wechselwirkung mit dem Baugrund bzw. dem Gebirge. Dieses ist als Belastung, als tragendes Element und als Baustoff zu sehen. Zum anderen kann jedes Bauprojekt als Unikat mit einmaligen Bedingungen gesehen werden, auf welches viele verschiedene Einflüsse einwirken. Durch seine Natur (Tunnellänge) wirken sich die nur in Maßen bekannten Bedingungen und insbesondere die häufig unklaren Eigenschaften des Baugrundes besonders stark auf die Komplexität des Tunnelbaus aus. Die Heterogenität des Bodens lässt weder eine einheitliche, noch eine genaue Erkundung des gesamten, durchfahrenen Bodens zu. Durch die Auswahl von geeigneten Tunnelbauverfahren bzw. Tunnelvortriebsverfahren wird versucht, die verschiedenen geologischen und geotechnischen Parameter zu berücksichtigen. Die Anpassungsfähigkeit des jeweiligen Bauverfahrens an diese sich immer wieder ändernden Parameter ist von entscheidender Bedeutung für das Tunnelbauprojekt.³⁶¹

³⁶⁰ Vgl. Schwarz, 2014, S.3.

³⁶¹ Vgl. ebenda, S.3.

6.1.1 Begriffe Tunnelbau

Im Folgenden werden die maßgebenden Begriffe des Tunnelbaus erläutert. Viele der Bezeichnungen stammen ursprünglich aus dem Bergbau, da der Tunnelbau aus diesem hervorgegangen ist.³⁶²

Die Untertagebauten werden nach den Aufgaben der fertiggestellten Bauwerke eingeteilt:³⁶³

1. **Kammer:** Eine Kammer ist ein kleiner Felshohlraum zur Lagerung von Gütern.
2. **Kaverne:** Eine Kaverne ist ein natürlicher oder künstlich geschaffener unterirdischer Hohlraum mit großem Querschnitt und relativ geringer Längenausdehnung. Sie dient der Aufnahme von festen, flüssigen oder gasförmigen Gütern, Maschinen oder Fahrzeugen, Erzeugungsanlagen, Fabrikationsräumen oder militärischen Anlagen. Sie ist durch Tunnel, Stollen oder Schächte mit der Erdoberfläche verbunden.
3. **Schacht:** Ein Schacht ist ein unterirdischer, langgestreckter, lotrechter oder schräg (mehr als 20 % zur Horizontalen) verlaufender Hohlraum zur Überwindung von Höhenunterschieden.
4. **Stollen:** Ein Stollen ist ein unterirdischer, langgestreckter, horizontaler oder schräg (weniger als 20 % zur Horizontalen) verlaufender Hohlraum mit kleinen Ausbruchflächen. Er dient zur Aufnahme von Rohr- und Kabelleitungen, als Freispiegel- oder Druckwasserstollen, als Zugangs- oder Lüftungstollen für Kavernen sowie als Verbindungsweg oder Hilfsbauwerk während der Bauausführung und besitzt oft nur eine Öffnung zur Tagesoberfläche.
5. **Tunnel:** Ein Tunnel ist ein unterirdischer, langgestreckter, horizontaler oder wenig geneigt verlaufender, unterirdischer Hohlraum. Er dient dem Fußgänger-, Radfahrer-, Straßen-, Eisenbahn- und dem Schiffsverkehr, der Aufnahme von Rohr- und Kabelleitungsgängen sowie Versorgungsnetzen. Ein Tunnel hat mindestens zwei Öffnungen zur Tagesoberfläche.

Für die Tunnelgeometrie werden die folgenden Begriffe verwendet:³⁶⁴

- **Tunnelumfang:** Wird in Firste, Ulmen und Sohle eingeteilt.
- **Firste:** Decke des Tunnels
- **Ulme:** Seitenwand des Tunnels
- **Sohle:** Boden des Tunnels
- **Tunnelquerschnitt:** Wird in Kalotte, Strosse/Kern, Ulmen/Kämpfer und Sohle eingeteilt.
- **Kalotte:** Oberes Drittel des Tunnelquerschnitts
- **Strosse:** Unterer Teil des Tunnelquerschnitts

³⁶² Vgl. Schwarz, 2014, S.4.

³⁶³ Vgl. ebenda, S.4 f.

³⁶⁴ Vgl. ebenda, S.8.

Weitere Begriffe und Bezeichnungen:³⁶⁴

- **Ortsbrust:** An der Ortsbrust findet der bergmännische Vortrieb statt.
- **Vortrieb:** Der Vortrieb bezeichnet die Abschlagtiefe je Angriff.
- **Angriff:** Als Angriff werden die Arbeiten zum Lösen des Gesteins durch Bohren, Sprengen oder Fräsen bezeichnet.
- **Abschlag:** Der Abschlag ist der Vortrieb je Angriff.

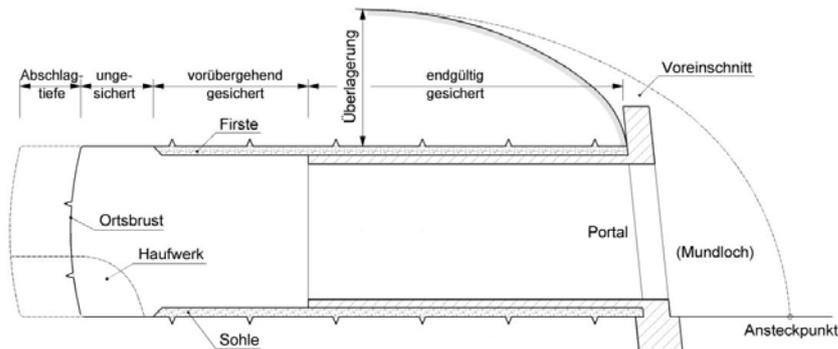


Abb. 34: Bezeichnungen Tunnelnähanschnitt³⁶⁵

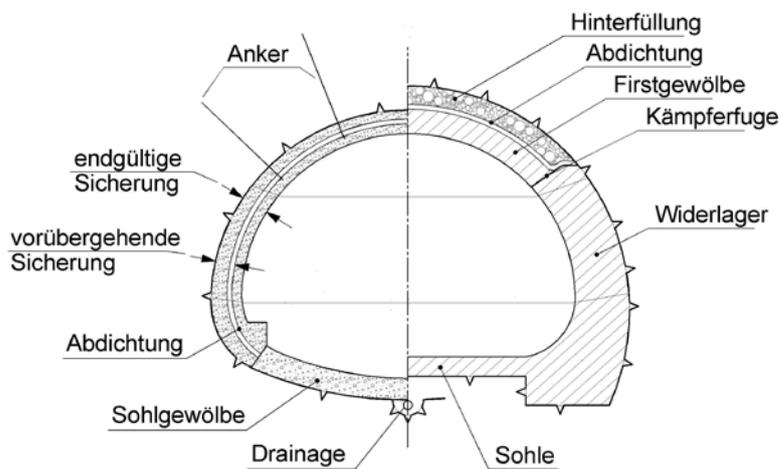


Abb. 35: Bezeichnungen Tunnelquerschnitt³⁶⁶

³⁶⁵ Schwarz, 2014, S.7.

³⁶⁶ Ebenda, S.7.

6.1.2 Vortriebsmethoden im Tunnelbau

Durch die Auswahl einer geeigneten Vortriebsmethode wird versucht, die verschiedenen geologischen und geotechnische Parameter zu berücksichtigen. Die Anpassungsfähigkeit des jeweiligen Bauverfahrens an diese sich immer wieder ändernden Parameter ist von entscheidender Bedeutung für das Tunnelbauprojekt.³⁶⁷

Allen Methoden ist gemein, dass ihr Ablauf einem sequentiellen Takt folgt, welcher sich aus Ausbruch, Sicherung und Schüttern zusammensetzt. Je nach Vortriebsmethode können sich diese Abschnitte auch überlappen oder parallel laufen. Entscheidend für die Auswahl einer bestimmten Vortriebsmethode sind die folgenden Parameter:³⁶⁸

- Querschnitt, Länge, Trasse und Gefälle des Tunnels
- Starre oder nachgiebige Ausbauart
- Ausbruchsklasse mit dazugehörigen Sicherungsmaßnahmen
- Abbaufähigkeit und Abrasivität des Gesteins, bezogen auf die Abbaugeräte
- Hydrologische Verhältnisse
- Tiefenlage und erschütterungsempfindliche Überbauung (z.B. bebauter Bereich)
- Umweltschutz (z.B. Lärm, Erschütterung, Naturschutzgebiet)
- Weitere Parameter (z. B. erforderliche Vortriebsgeschwindigkeit)

Bei den Vortriebsmethoden kann zwischen einer offenen und geschlossenen Bauweise unterschieden werden. Bei der geschlossenen Bauweise kann wiederum zwischen universellem Vortrieb, maschinellem Vortrieb und Microtunnelvortrieb gewählt werden. Die Verfahren des universellen Vortriebs sind gemäß der möglichen Ausbruch- bzw. Lösevorgänge und der notwendigen Stützung bzw. Sicherung nach Fest- oder Lockergestein zu wählen.

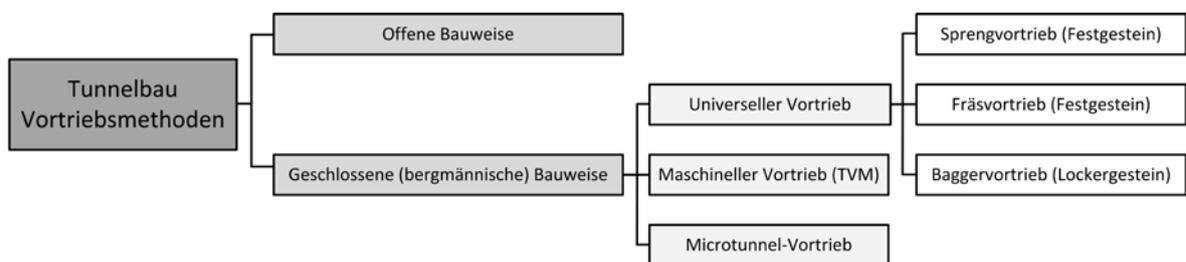


Abb. 36: Einteilung Vortriebsmethoden Tunnelbau ³⁶⁹

³⁶⁷ Vgl. Schwarz, 2014, S.3.

³⁶⁸ Vgl. ebenda, S.9.

³⁶⁹ In Anlehnung an ebenda, S.10.

6.2 Maschineller Tunnelvortrieb

Der Spezialbereich des Bauwesens, der sich mit dem Erstellen von unterirdischen Hohlräumen (Tunnel, Stollen) für langgestreckte Untertagebauwerke, wie beispielsweise Verkehrsanlagen, Leitungsgänge oder Versorgungsnetze beschäftigt, ist wie bereits im vorgegangenem Kapitel dargestellt, der Tunnelbau. Zur Erstellung dieser Bauwerke können verschiedene Verfahren gewählt werden. Je nach Überdeckungshöhe wird eine offene oder geschlossene Bauweise gewählt. Die geschlossene, bergmännische Bauweise (Tunnelvortrieb) erlaubt die Herstellung der unterirdischen Hohlräume mit äußerst geringer Beeinflussung der oberirdischen Bebauung bzw. Infrastruktur. Dies ist insbesondere in dicht besiedelte Innenstadtbereichen wichtig, um die Beeinträchtigung der stark genutzten und somit sensiblen Infrastruktur so gering wie möglich zu halten.³⁷⁰

Beim Tunnelvortrieb kann zwischen zwei Verfahren unterschieden werden. Zum einen der konventionelle, zyklische Vortrieb mit Sprengvortrieb oder maschinellem Vortrieb. Zum anderen der kontinuierliche (jedoch ebenfalls zyklisch getaktet bzgl. der einzelnen Prozesse) Vortrieb mit Tunnelvortriebsmaschinen (TVM). Die TVM können wiederum in Tunnelbohrmaschinen (TBM), welche eher im Festgestein verwendet werden und Schildvortriebsmaschinen (SM), welche eher im Lockergestein (und in weniger tragfähigen, stark gebrächen, weich-plastischen oder schwimmenden Böden) verwendet werden, unterteilt werden.³⁷¹

Um das Prozessmodell zielführend zu entwickeln und zu gestalten, wurde ein bestimmtes Verfahren zur Tunnelherstellung ausgewählt. Dieses sollte erstens ein bekanntes und oft eingesetztes Verfahren mit eindeutigen Ablauf und Prozessschritten sein. Zweitens sollte es eine gute Ausgangsbasis zur Erweiterung (insbesondere in Hinsicht auf die Komplexität der Tunnelverfahren) darstellen und drittens einen klar definierten Spezialbereich des Tunnelbaus abdecken. Aus diesem Grund wurde der Rohrvortrieb gewählt. Das gewählte Verfahren ist ein Spezialbereich des Schildvortriebs, welcher einen Unterbereich des Vortriebs mit Tunnelvortriebsmaschinen darstellt. Um ein grundsätzliche Verständnis für den Rohrvortrieb zu schaffen, werden diese Bereiche im Folgenden kurz erläutert.

³⁷⁰ Vgl. Maidl et al., 2011, S.1.

³⁷¹ Vgl. Schwarz, 2017, S.2 ff.

6.2.1 Tunnelvortriebsmaschinen

Die Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) können danach unterteilt werden, ob sie den gesamten Tunnelquerschnitt mit einem Bohrkopf oder Schneidrad im Vollschnitt abbauen oder ob dies teilflächig geschieht. Hierbei werden wie in Abb. 37 dargestellt, Tunnelbohrmaschinen (TBM), Doppelschildmaschinen (DSM), Schildmaschinen (SM) und Kombinationsmaschinen (KSM) unterschieden.

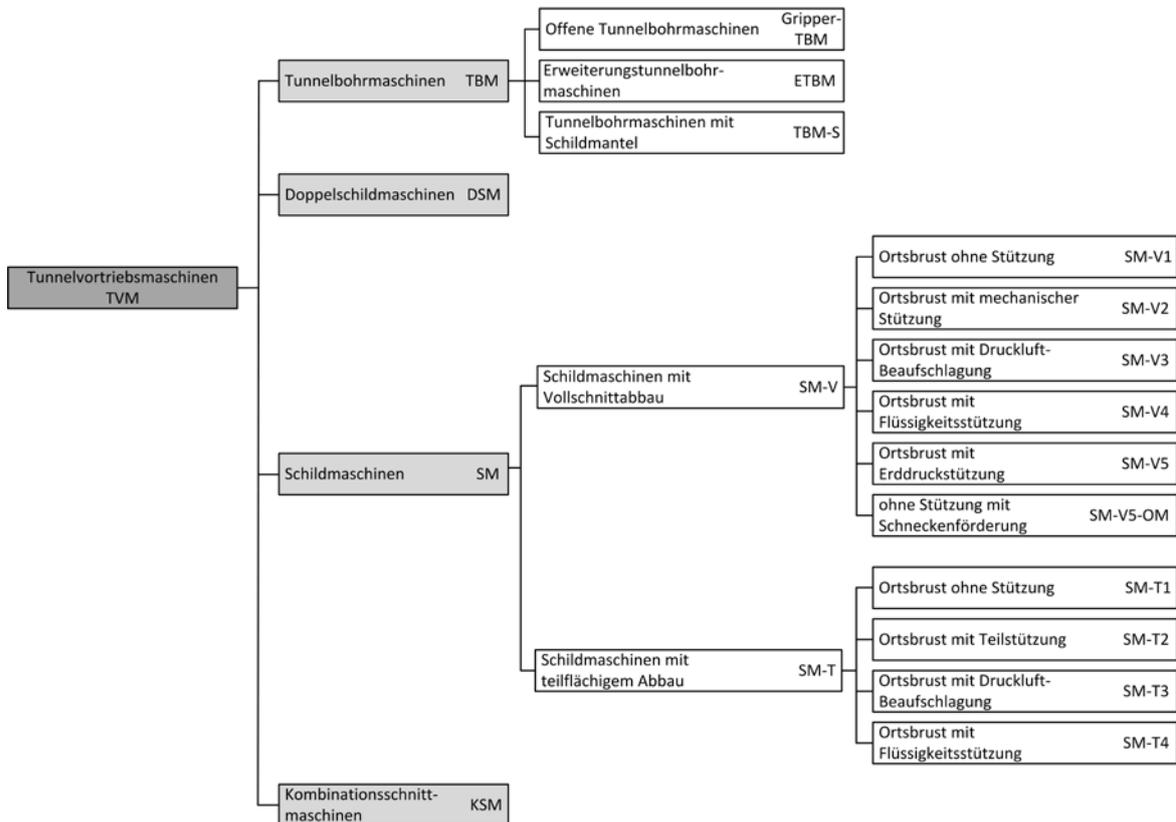


Abb. 37: Einteilung der Tunnelvortriebsmaschinen³⁷²

³⁷² Maidl et al., 2011, S.431, entsprechend der Empfehlung des „Deutschen Ausschusses für unterirdisches Bauen e.V.“ (DAUB)

6.2.2 Schildvortriebsverfahren

Das Prozessmodell wird für die Anwendung im Rohrvortrieb mit einem Schild konzipiert. Eine Adaption sollte auch auf andere Vortriebsverfahren möglich sein. Der Rohrvortrieb (siehe genaue Ausführung im Kapitel 6.3) des Projektes (welches für die erste Validierung des Prozessmodelles genutzt wurde, siehe Kapitel 8.1) entsprach dem Schildvortrieb mit Hydroschild. Aus diesem Grund wird hier das Schildvortriebsverfahren genauer erläutert. Das Schildvortriebsverfahren (SM-V) erlaubt es Tunnel bei kleinen wie großen Überdeckungshöhen, im Grundwasser und unter Bebauung zu erstellen, ohne Störungen an der Oberfläche oder Setzungen zu verursachen. Das Verfahren ist somit optimal für den Einsatz in Gebieten geeignet, in denen eine offene Bauweise nicht akzeptabel oder möglich ist. Beispielsweise in Innenstadtgebieten (Unterquerung von Straßen, Bebauung) oder in Bereichen von Bahnanlagen, Flughäfen und Flüssen.

Grundprinzipien

Beim Vortrieb mit einem Schild erfolgen die zwei Arbeitsschritte „Herstellung des Hohlraums“ und „Stützung“ zeitgleich. Hierbei wird der Boden ausgebrochen und ein Schildmantel mittels einer Hydraulikpresse in die Tunnelachse eingeschoben. Diese Stahlkonstruktion stützt den entstandenen Hohlraum ab, bis die endgültige Tunnelsicherung (z.B. Tübbing, Rohre, Schalbeton, Spritzbeton) eingebaut ist. An der Ortsbrust selbst kann die Stützung schon während des Auffahrens gegen den anstehenden Boden, das Gebirge bzw. das Grundwasser auf folgende Arten erfolgen:³⁷³

- Natürliche Stützung
- Mechanische Stützung
- Druckluftstützung
- Flüssigkeitsstützung (siehe Abb. 38)
- Erdstützung.

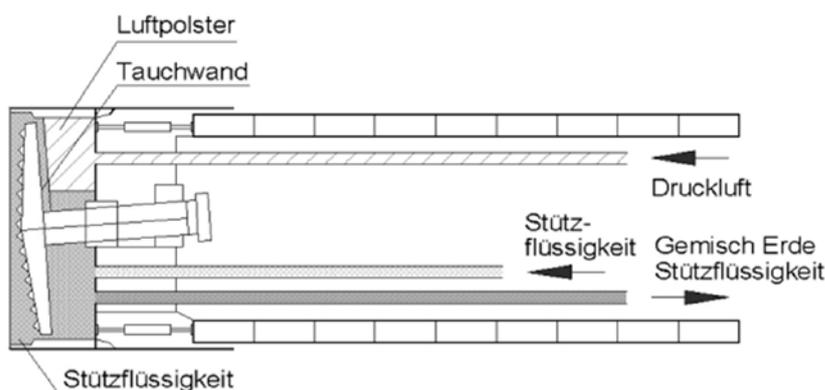


Abb. 38: Stabilisierung der Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4)³⁷⁴

³⁷³ Vgl. Schwarz, 2016 (8), S.37 ff.

³⁷⁴ Schwarz, 2016 (8), S.39.

Der Abbau im Schildvortrieb kann auf verschiedene Arten erfolgen. Das einfachste, heute kaum mehr praktizierte Verfahren ist der Handabbau. Beim Abbau mit Maschinen wird zwischen mechanischem teil- und vollflächigem Abbau unterschieden. Zudem sind der hydraulische Abbau und der Extrusionsabbau möglich. Das abgebaute Material wird je nach Bodenart durch Trocken-, Flüssig- oder Stickstoffförderung mittels Förderleitungen, Förderbänder, Erdtransporter oder gleisgebundener Systeme geschuttet.³⁷⁵

Es sind die folgenden Vor- und Nachteile des Schildbauverfahrens zu nennen:³⁷⁶

Vorteile

- Möglichkeit von Mechanisierung
- Hohe Vortriebsgeschwindigkeit
- Profilgenauigkeit
- Geringe Beeinflussung oberflächiger Bebauung
- Große Sicherheit für Personal
- Steuerung der Vortriebsstrecke
- Umweltfreundlich / Wenig Lärm

Nachteile

- Lange Vorlaufzeit für die Planung, Produktion und Montage des Schildes
- Lange Einarbeitungszeiten
- Aufwendige und kostenintensive Baustelleneinrichtung
- Leistungsrisiko bei wechselndem Boden
- i.d.R. festgelegte Querschnitte mit nur geringen Variationsmöglichkeiten
- Hoher Aufwand bei Änderung der Querschnittsgeometrie

Ortsbrust mit Flüssigkeitsstützung (SM-V4)

Bei Schilden mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust erfolgt die Stützung mit Hilfe eines Filterkuchens³⁷⁷ an der Ortsbrust. Eine unter Druck stehende Stützflüssigkeit (Suspension, Betonitsuspension, Wasser, Schaum) dringt in die oberflächennahen Poren des anstehenden Baugrundes ein. Der Stützdruck muss größer sein als die Summe aus dem anstehenden Wasser- und Erddruck. Der Tunnel wird durch eine Druckwand zur Abbaukammer abgeschlossen. Der Druck in der Abbaukammer kann sehr exakt mithilfe eines kompressiblen Luftpolsters (siehe Abb. 38) zwischen der Druck- und Tauchwand gesteuert werden. Die Drucksteuerung des berechneten Sollmaßes erfolgt über vollautomatische Mess- und Regelkreise, um Setzungen oder Hebungen durch plötzliche Druckschwankungen (z.B. bei veränderter Bodendurchlässigkeit) zu verhindern. Der Boden wird von einem Schneidrad vollflächig abgebaut. Große Steine werden durch Disken am Schneidrad bzw. Steinbrecher in der Abbaukammer zerkleinert. Der gesamte Abbau wird einschließlich der Stützflüssigkeit über Pumpen hydraulisch gefördert und anschließend wird das Flüssigkeits-Boden-Gemisch in einer Separationsanlage getrennt und die Stützflüssigkeit wird zur Wiederverwendung zurück zur Ortsbrust gepumpt.³⁷⁸

³⁷⁵ Vgl. Maidl et al., 2011, S.3 ff.

³⁷⁶ Vgl. Maidl et al., 2011, S.2, vgl. Schwarz, 2016 (8), S.40.

³⁷⁷ Auch „Cake“ genannt.

³⁷⁸ Vgl. Schwarz (8), 2016, S.49 ff.

6.3 Rohrvortrieb

Für den Bau begehrter Tunnelquerschnitte im Bereich des Leitungsbaus gibt es keine eigenen Verfahren. Deshalb können die in Kapitel 6.2 vorgestellten geschlossenen Vortriebsverfahren für den Bau von Verkehrstunneln auch für den Bau von Ver- und Entsorgungstollen verwendet werden. Der unterirdische Rohrvortrieb kleiner Querschnitte für den Leitungsbau zur Wasserversorgung, zur Abwasserbeseitigung, für Gas, für Fernwärme oder für Kabel nimmt aufgrund der bereits im Kapitel 6.2 erwähnten Vorteile an Bedeutung zu. Mit dem Rohrvortrieb können Rohrleitungen in Gebieten (Innenstadt, Bahnanlagen, Flughäfen, Flüssen) gebaut werden, in denen eine offene Bauweise nicht akzeptabel oder möglich ist.³⁷⁹ Leitungen mit Durchmessern zwischen 1 m und 5,5 m werden zu 60 % im Rohrvortrieb erstellt.³⁸⁰

6.3.1 Allgemeines

Das Vorgehen beim Rohrvortrieb entspricht dem Prinzip des Schildvortriebs. Hierbei wird der Boden an der Ortsbrust gelöst und gleichzeitig werden vom Startschacht aus Spezialrohre mit einer hier installierten Hydraulikpresse (= Hauptpresstation) in den Boden vorgepresst bzw. eingeschoben.³⁸¹ Die Förderung des abgebauten Bodens erfolgt ebenfalls gleichzeitig durch die erstellte Rohrstrecke. Der Vortrieb ist mit Hilfe der Pressen (Betätigung nur einzelner Pressen) steuerbar, wodurch gekrümmte Radien und Gradienten aufgeföhren werden können. Rohre mit einem Durchmesser von bis zu DN 3000 können mit Straßenfahrzeugen zur Baustelle geliefert werden, jedoch müssen größere Rohre auf der Baustelle selbst oder in ihrer Nähe gefertigt werden.³⁸²

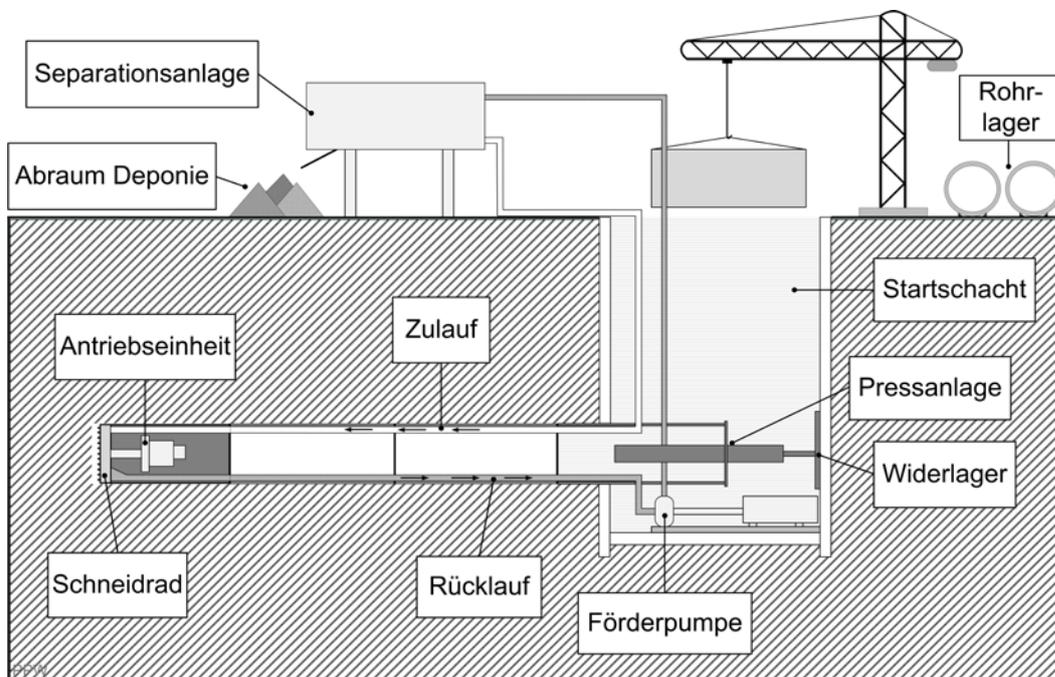


Abb. 39: Schildvortrieb im Rohrvortrieb³⁸³

³⁷⁹ Vgl. Maidl et al., 2011, S.196 f.

³⁸⁰ Vgl. ebenda, S.344. Verweis auf Erhebung der STUVA. Quelle: Nußbaumer, 1988.

³⁸¹ Vgl. Praetorius & Schöber, 2016, S.3

³⁸² Vgl. Maidl et al., 2011, S.196 f.

³⁸³ Eigene Darstellung in Anlehnung an Maidl et al., 2011, S.361.

6.3.2 Ablauf Rohrvortrieb

In einem Startschacht werden gegenüber der Tunnelöffnung ein Widerlager und eine Pressanlage installiert. Die Rohre werden über eine Kranvorrichtung in den Startschacht abgesenkt. Der Vortrieb erfolgt indem der Bohrkopf den Boden abbaut, die Pressanlage die Rohre vorpresst und der abgebaute Boden kontinuierlich (während des Bodenabbaus) gefördert wird. Über einen stählernen Druckausgleichsring werden die Kräfte der Pressanlage auf die Vorpressrohre weitergeleitet. Die Vorpressrohre sind i.d.R. aus Stahlbeton nach DIN 4035. Der Vorteil des Stahlbetons ist, dass mit ihm i.d.R. alle statischen Anforderungen erfüllt werden können und auch gelenkige Rohrverbindungen möglich sind. Auch die Verwendung von Stahl, Stahlfaserbeton, Steinzeug, glasfaserverstärktem Kunststoff, Verbundwerkstoff oder duktilem Gusseisen für die Vorpressrohr ist möglich. Ist die Vortriebslänge zu groß, können in regelmäßigen Abständen (ca. alle 80 bis 250 m) Zwischenpressstationen angeordnet werden, was ein taktweises Vorpressen der Rohrabschnitte ermöglicht. Die von der Pressanlage zu erbringenden Kräfte müssen die Summe von Spitzenwiderstand und Mantelreibung überwinden. Diese ergeben sich aus der Bodenart, dem Rohrdurchmesser, dem Rohrwerkstoff, der Rohrlänge, dem Gradientenverlauf, den notwendigen Steuerkorrekturen und den Bodenaufasten. Um diesen Widerstand zu reduzieren, kann eine Betonitsuspension zwischen Rohr und Boden eingepresst werden. Durch diese Schmierung wird die Mantelreibung bis auf rund 50 % verringert. Beim Vortrieb im Grundwasser erfolgt diese Schmierung durch das Wasser selbst. Der Abtransport des abgebauten Bodens erfolgt i.d.R. maschinell mittels Flüssigkeitsförderung. In einer Separationsanlage wird anschließend das Flüssigkeits-Boden-Gemisch getrennt und die Stützflüssigkeit wird zur Wiederverwendung zur Ortsbrust zurückgepumpt.³⁸⁴

Vorteile und Nachteile des Schildbauverfahrens / Rohrvortriebs

Zusammenfassend sind die folgenden Vor- und Nachteile des Schildbauverfahrens bzw. des Rohrvortriebs zu nennen:³⁸⁵

Vorteile

- Große Presslänge
- Große Zielgenauigkeit
- Gekrümmte Trassen und Gradienten
- In nahezu allen Bodenarten und im Grundwasser einsetzbar
- Hoher Mechanisierungsgrad

Nachteile

- Relativ großer Start- und Zielschacht
- Ausbildung eines Presswiderlagers im Startschacht erforderlich
- Spezialrohre zur Aufnahme von hohen Kantenpressungen erforderlich
- Unter Druckluft hoher Luftverbrauch und Gefahr von Ausbläsern

³⁸⁴ Vgl. Maidl et al., 2011, S.198 f.

³⁸⁵ Vgl. ebenda, S.196 f.

Wert-Box 10: Wert für das Prozessmodell

Das Schildvortriebsverfahren und der Rohrvortrieb sind optimal für den Einsatz in Innenstadtbereichen oder in Bereichen von Bahnanlagen, Flughäfen und Flüssen geeignet. Bei Vortrieben mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust dringt eine unter Druck stehende Stützflüssigkeit in die oberflächennahen Poren des anstehenden Baugrundes ein. Der Boden wird von einem Schneidrad vollflächig abgebaut, einschließlich der Stützflüssigkeit hydraulisch gefördert, in einer Separationsanlage von der Stützflüssigkeit getrennt, welche zur Wiederverwendung zur Ortsbrust zurückgepumpt wird.

Beim Rohrvortrieb werden mit dem Lösen des Bodens vom Startschacht aus Spezialrohre mit einer Hydraulikpresse in den Boden vorgepresst. Diese Pressanlage ist gegenüber der Tunnelöffnung auf einem Widerlager installiert. Die Rohre werden in den Startschacht mittels einer Kranvorrichtung abgesenkt. Die Arbeiter kommen über einen Aufzug oder eine Treppe in den Startschacht. In regelmäßigen Abständen werden Zwischenpressstationen (= Dehner)³⁸⁶ angeordnet.

Zu beachtende Prozesse / Installationen im Schildbauverfahren / Rohrvortrieb

- Abbau Boden / Schneidrad
- Druckkammer
- Förderung Abraum, Stützflüssigkeit / Pumpenanlage
- Rohrleitung, Stromversorgung
- Pressstation / Widerlager
- Zwischenpressstation / Dehner
- Separieranlage / Deponie / Abraumabtransport
- Kran (-anlage)
- Aufzug, Treppe
- Rohranlieferung, -ausstattung / Rohrlager, BE-Fläche

³⁸⁶ Ca. alle 80 - 90 Meter werden Zwischenpressstationen / Dehner angeordnet, wobei in einem Stahlmantelrohr ein Vorschubzylinder integrierter wird. Durch diesen Dehner wird der Vortrieb in mehrere Abschnitte unterteilt und somit die aufzubringende Vortriebskraft der Hauptpressstation reduziert. Vgl. Praetorius & Schößler, 2016, S. 3.

6.4 Sprengvortrieb

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert, wurde für die zielführende Entwicklung, Gestaltung und erste Validierung des Prozessmodells ein bestimmtes Verfahren, der Rohrvortrieb zur Tunnelherstellung, ausgewählt. Jedoch wird in dieser Arbeit auch darauf hingewiesen, dass das Prozessmodell durchaus auf andere Tunnelbauverfahren adaptierbar ist. Um diese Möglichkeit aufzuzeigen, wird im Kapitel 7 in Grundzügen die Anwendung des Prozessmodells auf einen weiteren Bereich des Tunnelbaus, den Sprengvortrieb, dargestellt. Um ein Verständnis für die Begrifflichkeiten und Abläufe zu gewährleisten, werden die Grundlagen des Sprengvortriebs in den folgenden Abschnitten kurz erläutert.

6.4.1 Sprengvortrieb Allgemeines

Das Gestein mit Hilfe des Sprengens auszubrechen ist eine seit langer Zeit bekannte, effektive und schnelle Vortriebsart im Tunnelbau, weshalb der Sprengvortrieb auch als die „konventionelle“ Ausbruchsart bezeichnet wird. Seine Bedeutung hat der Sprengvortrieb auch trotz der modernen und sich technisch schnell weiterentwickelnden Vortriebsmaschinen nicht verloren.³⁸⁷ Insbesondere bei Felsgestein mit einer mittleren bis hohen Festigkeit ist der Sprengvortrieb das geeignetere Verfahren im Vergleich zu Teilschnitt- oder Tunnelbohrmaschinen.³⁸⁸ Es lassen sich im Groben zwei Verfahren des Ausbruchs unterscheiden, der Voll- und der Teilausbruch, welche jeweils nur unter bestimmten Bedingungen möglich sind und ihre jeweiligen Vor- und Nachteile mit sich bringen.³⁸⁹

Bedingungen Vollausbruch

1. Ausreichend lange Standzeit des anstehenden Gebirges in Abhängigkeit von der Querschnittsgröße und -form, damit das Gebirge nach dem Auffahren des Hohlraums seine Form behält und nicht nachgibt bzw. zusammenbricht.
2. Die vorübergehende Sicherung muss zur Standzeit des anstehenden Gebirges passen. Die Zeit zum Einbringen einer Sicherung muss ausreichen. Bei ausreichender Standfestigkeit des Gebirges kann auf eine Sicherung (ausgenommen Kopfschutz zur Sicherheit der Mannschaft) verzichtet werden.
3. Die verwendeten Geräte (z.B. Bohrwagen, Bühne, Schuttereinrichtung) müssen für die Randbedingungen (z.B. Ausbruchquerschnitt) anpassbar und verwendbar sein. Das Mindestprofil für ein wirtschaftliches Auffahren beträgt 5 m². Kleinere Querschnitte würden Personal und Maschinen behindern.

Vorteile Vollausbruch

- Nur ein gesamter Abschlag, wodurch keine mehrmaligen Spannungsumlagerungen nötig sind und somit gebirgsschonend vorgetrieben wird.
- Durch den freien Arbeitsraum an der Ortsbrust sind ein hoher Mechanisierungsgrad und damit ein schneller, optimierter Ausbruch mit kurzen Bauzeiten möglich.
- Keine Interaktionen zwischen den einzelnen Betriebspunkten, wodurch eine gute Organisation und Wirtschaftlichkeit möglich werden.

³⁸⁷ Vgl. Maidl et al., 1997, S.7.

³⁸⁸ Vgl. Girmscheid, 2008, S.71.

³⁸⁹ Vgl. Maidl, 1997 et al., S.11.

Nachteile Vollausbuch

- Gefahrenpotential nach dem Ausbruch durch wechselnde / schlechter Geologie oder Wasseranfall, aufgrund des relativ großen, ungesicherten Bereichs an der Ortsbrust.
- Geringe Flexibilität bzgl. eines Wechsels zum Teilausbuch aufgrund der hohen Mechanisierung.

Bedingungen Teilausbuch

1. Ausreichend lange Standzeit des anstehenden Gebirges für einen Vollausbuch ist nicht gegeben.
2. Die vorübergehende Sicherung für einen Vollausbuch passt nicht zur Standzeit des anstehenden Gebirges. Die Zeit zum Einbringen einer Sicherung ist nicht ausreichend.
3. Die verwendeten Geräte (z.B. Bohrwagen, Bühne) erfassen nicht den ganzen Querschnitt und die Schuttereinrichtungen erfassen nicht den gesamten Abschlag, weshalb dieser in Teilquerschnitte aufgeteilt werden muss.

6.4.2 Sprengvortrieb Prozesse

Der Sprengvortrieb lässt sich in einzelne, sich ständig zu wiederholende, diskontinuierliche Teilabschnitte unterteilen.³⁹⁰ Hierbei lassen sich die auftretenden Prozesse mit Blick auf das in dieser Arbeit entwickelte Prozessmodell in Schlüsselprozesse / DWEP und in Unterstützungsprozesse / IWEP unterteilen.

Die DWEP erzeugen auch beim Sprengvortrieb einen tatsächlichen Wert und sind für den Vortrieb zwingend notwendig. Durch sie wird der Boden / Fels abgebaut bzw. der Arbeitsraum wird für die Ausführung dieser Prozesse gesichert. Die DWEP liegen auf dem Kritischen Weg. Fällt also einer dieser Prozesse dauerhaft aus, kommt es zum Erliegen des gesamten Vortriebs.

Die IWEP erzeugen keinen direkten Wert, sind jedoch für die Werterzeugung notwendig und aufgrund ihrer Notwendigkeit teilweise unvermeidbar. Im Normalfall haben sie keinen bzw. nur geringen zeitkritischen Einfluss auf den Sprengvortrieb.

DWEP / Schlüsselprozesse für den Taktbetrieb im Sprengvortrieb**Anordnungsbeziehungen**

Die Anordnungsbeziehungen der Prozesse (Vorgänge) definieren die Verknüpfungen bzw. Abhängigkeiten dieser und ergeben sich aus technischen, verfahrenstechnischen bzw. technologischen Gründen. Die DWEP liegen i.d.R. auf dem Kritischen Weg (Bearbeitungszeit der verbundenen und voneinander abhängigen Vorgänge kann nicht verlängert werden, ohne die Gesamtzeit zu verlängern, da keine Pufferzeiten vorhanden sind) und sind meist (Überlappungen möglich) in einer Normalfolge oder in einer Anfangsfolge zu leisten. Die DWEP im Sprengvortrieb (siehe Abb. 40) sind in der Abfolge Bohren, Laden, Sprengen, Bewettern, Schüttern, Sichern und Vermessen zu erbringen. Während des Bohrvorgangs können bereits die ersten Bohrlöcher mit Sprengstoff geladen werden. Diese beiden Prozesse haben eine Anfang-Anfang Beziehung (AA) mit einem gewissen Zeitabstand³⁹¹ dazwischen. Das Sprengen hingegen ist nicht parallel / überlappend zu einem anderen

³⁹⁰ Vgl. Girmscheid, 2008, S.71 und vgl. Maidl et al., 1997, S.9.

³⁹¹ Mindestens die Zeit, die für das Bohren eines Loches benötigt wird.

Prozess möglich und ist direkt³⁹² an den Ladevorgang anzuschließen, also liegt hier eine Normalfolge (NF) bzw. Ende-Anfang Beziehung (EA) vor.

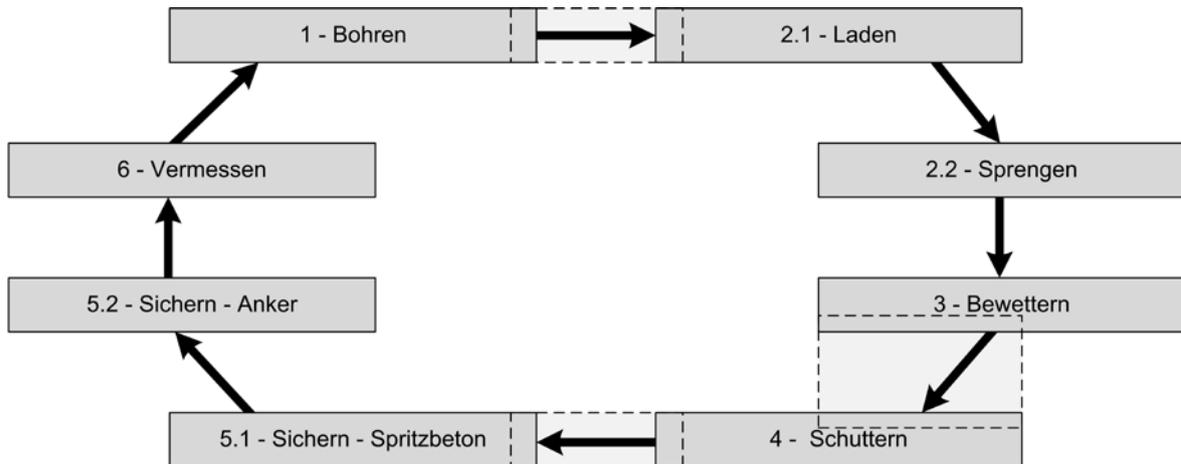


Abb. 40: Schlüsselprozesse Sprengvortrieb (mit Überschneidungsbereichen)³⁹³

1. Bohren

Die Herstellung von Bohrlöchern dient bzgl. des Sprengvortriebs der Aufnahme des Sprengstoffs, kann aber auch für die Einbringung von Ankern, der Druckwasserentlastung, der Erkundung der Geologie und des anstehenden Wassers angewendet werden. Um das Gestein mittels Sprengung zu lösen, ist eine ausreichende Anzahl an Bohrlöchern zur Aufnahme des Sprengmittels nötig. Entscheidend für ein optimales Lösen ist neben der Anzahl die auf die vorliegenden Randbedingungen abgestimmte Anordnung der Bohrlöcher.³⁹⁴ Ebenso entscheidend sind die Richtung und Länge der Bohrlöcher, weshalb Bohrlafetten eingesetzt werden, welche auf dem Bohrwagen montiert sind.³⁹⁵ Die Bohrlöcher haben einen Durchmesser von ca. 17 - 127 mm, welche i.d.R. patronisierten, gelatinösen Sprengstoff³⁹⁶ aufnehmen. Je nach Tunnelquerschnitt beträgt die Bohrlänge zwischen 3 und 5 m. Die Bohrbarkeit (= Bohrgeschwindigkeit) hängt von der Bohrausrüstung (z.B. Leistung Bohrhammer), dem Baubetrieb / Arbeitsprozess (z.B. Bedienung der Bohrgeräte) und insbesondere von der Härte (= Druck- und Zugfestigkeit) des Gesteins ab.³⁹⁷ Das Ziel beim Bohren ist ein möglichst schnelles, gebirgsschonendes und profilgenaues Lösen des Gesteins. Die Optimierung des Bohrablaufs bzw. der Bohrtechnik wurde in den letzten Jahrzehnten durch die Einführung hydraulischer Bohreinheiten (höhere Bohrleistungen), den Einsatz von Elektronik zur Steuerung (von Schlagleistung, Vorschub, Spülung) und die Automatisierung der Abläufe (computergestützte Positionsbestimmung, Anti-Festbohrsicherungssensorik, Datenauswertung) erreicht. Im Tunnelbau werden i.d.R. selbstfahrende, radgebundene, dieselangetriebene Bohrgeräte / Bohrwägen mit elektro-hydraulischer Bohrausrüstung und mit bis zu vier Bohrramen eingesetzt.³⁹⁸

³⁹² Ohne Berücksichtigung der Sicherheitszeit für das Entfernen des Personals.

³⁹³ In Anlehnung an Schwarz und Engelhardt, 2016 (2), S.3.

³⁹⁴ Vgl. Schwarz und Engelhardt, 2016 (2), S.38 ff.

³⁹⁵ Vgl. Kolymbas, 1998, S.61.

³⁹⁶ Auch pulverförmige und Emulsionssprengstoffe möglich, aber im Tunnelbau eher unüblich.

³⁹⁷ Vgl. Girmscheid, 2008, S.73.

³⁹⁸ Vgl. Schwarz und Engelhardt, 2016 (2), S.44 ff.

2. Sprengen

Sobald die Sprenglöcher gebohrt sind, folgt der DWEP Sprengen, welcher sich in die folgenden Arbeitsschritte / Einzelprozesse aufteilen lässt:³⁹⁹

1. Bohrloch freiblasen und prüfen⁴⁰⁰
2. Bohrloch mit Sprengstoff laden (Sprengpatronen einsetzen, engl. charging) und Zündmittel einbringen⁴⁰⁰
3. Zündsystem anbringen (Zündkreis installieren, Zündmittel mit Zündübertragung verbinden)
4. Zündkreis prüfen
5. Zünden / Sprengen

Die folgenden Ziele werden bei der Sprengung verfolgt:

- optimale Nutzung der eingesetzten Sprengmittel (Kosten)
- hoher Abschlagswirkungsgrad
- gute Zerkleinerung des Haufwerks und optimaler Böschungswinkel (Erleichterung Schüttern)
- Profilgenauigkeit
- Schonung des hohlraumumgebenden Gesteins (Erhalt der Tragwirkung)
- möglichst geringe Erschütterung für Anwohner

3. Bewetterung

Unter der Bewetterung sind alle technischen Maßnahmen zur Versorgung des Tunnels mit frischer Luft (Frischwetter) und der Abführung verbrauchter Luft und schädlicher Gase (Abwetter) zu verstehen. Hierbei wird der beim Sprengen (Sprengschwaden) und bei den Spritzbetonarbeiten entstehende Staub verdünnt und abgeleitet.⁴⁰¹

Es kann zwischen einer blasenden bzw. drückenden Bewetterung (Frischluft wird über die Lutte zur Ortsbrust, Abgase und Staub durch den Tunnel nach außen zum Portal gedrückt), einer saugenden Bewetterung (Schadstoffe und Staub werden durch die Lutte von der Ortsbrust aus dem Tunnel gesogen, Frischluft zieht durch den Sog durch den Tunnel nach) und einer Mischform von beiden (z.B. Hauptleitung saugend, Zusatzleitung drückend) unterschieden werden.⁴⁰²

³⁹⁹ Vgl. Girmscheid, 2008, S.79 f.

⁴⁰⁰ Ist bei ausreichend großer Ressourcenanzahl (verfügbare Arbeiter) bereits während der Bohrarbeiten möglich, sobald diese nicht behindert werden.

⁴⁰¹ Vgl. Schwarz, 2016 (6), S.3 ff.

⁴⁰² Vgl. Maidl et al., 1997, S.181.

4. Schuttern

Sobald die Bewetterung es erlaubt, kann mit dem DWEP Schuttern begonnen werden, welcher sich in die folgenden Arbeitsschritte / Einzelprozesse aufteilen lässt:⁴⁰³

1. Aufnahme Ausbruchmaterial
2. Abtransport des Ausbruchmaterial zur (Zwischen-)Deponie
3. Drainage verlegen (falls nötig)

Unter dem Schuttern werden die Aufnahme und der Abtransport (Übergabe an das Transportgerät bzw. die Transporteinrichtung) des durch die Sprengung entstandenen Ausbruchmaterials (Haufwerk) verstanden. Von der Ausbruchmenge, den Tunnelabmessungen (Platzbedarf im Querschnitt) und der Haufwerkcharakteristik des Ausbruchmaterials (max. Korngröße, Auflockerungsgrad, Kornverteilung, Kornform) hängt ab, welches Schuttergerät zum Einsatz kommt.⁴⁰⁴ Es können vier verschiedene Schuttergeräte unterschieden werden. Der Seitenlader, der Fahrlader, der Rad- bzw. Raupenlader und das Universalladegerät.⁴⁰⁵

Der Abtransport des Ausbruchmaterials kann auf verschiedene Arten erfolgen:⁴⁰⁶

1. Gleislose Förderung mittels Dumper (nur bei ausreichender Querschnittsgröße - zwei Fahrzeuge können ungehindert aneinander vorbeifahren - und befahrbarer Sohle möglich).
2. Gleisgebundene Förderung (zusätzliche Baumaßnahmen - Verlegung von Schienen und Leitungen für den Zug -, und Entwicklung eines Konzepts für das Wenden der Wagons an der Ortsbrust nötig; Störungen können folgeschwer sein und für Vortriebsstopp sorgen).
3. Kontinuierlicher Abtransport mittels Förderband (keine / kaum Behinderung des Ausbruchs; Ausbruchmaterial muss klein genug sein; zusätzliche Baumaßnahmen - Verlegung und Verlängerung Förderband nötig; nur bei Mindeststradien möglich; Störungen können folgeschwer sein und für Vortriebsstopp sorgen).
4. Hydraulische Förderung (aufwendige Aufbereitung des Ausbruchmaterials zur Beförderung und aufwendige Separation nach der Förderung nötig; Verlängerung der Förderstrecke nötig; Störungen können folgeschwer sein und für Vortriebsstopp sorgen).

Eine Möglichkeit zur Ablaufoptimierung ist, während der noch laufenden Bewetterung, das Schuttern mithilfe von Dumper mit abgeschlossenen Fahrerinnen bereits zu beginnen.

⁴⁰³ Vgl. Schwarz, 2016 (5), S.2 ff.

⁴⁰⁴ Vgl. Girmscheid, 2008, S.128 f.

⁴⁰⁵ Es sei auf u.a. Schwarz, 2016 (5), S.3 ff. und Girmscheid, 2008, S.129 ff. verwiesen.

⁴⁰⁶ Vgl. Schwarz, 2016 (5), S.15 ff.

5. Sichern

Sobald das Schuttern es erlaubt (vollständig oder ausreichend geschuttert), kann mit dem DWEP Sichern begonnen werden. Mit diesen Maßnahmen soll die Eigentragfähigkeit des Gebirges ermöglicht, unterstützt und günstig beeinflusst werden.⁴⁰⁷ Die Spritzbetonsicherung lässt sich in die folgenden Arbeitsschritte / Einzelprozesse aufteilen lässt:⁴⁰⁸

1. Versiegeln mit Spritzbeton (erste Lage)
2. Baustahlmatten einbringen und befestigen
3. Verbaubögen setzen (falls nötig)
4. Ankerlöcher bohren (falls nötig)
5. Anker einbauen (falls nötig)
6. Zweite Lage Spritzbeton aufbringen

Neben der Spritzbetonsicherung gibt es noch weitere Methoden zur Sicherung des Hohlraumes, welche auch gemeinsam eingesetzt werden können. Zu diesen zählen das Einbringen von Stahl- oder Gitterträgern, Ankern und Ausbaubögen sowie die Voraussicherung (Sicherung der Ortsbrust und des nach dem Ausbruch freistehenden Gewölbes mit Spießern oder Blechen⁴⁰⁹). Dies ist vor allem bei geringen Stehzeiten des Gebirges notwendig. Der Spritzbeton (erste Lage) dient zum einen der sofortigen und kraftschlüssigen Voraussicherung des Gebirges, indem der Beton direkt nach dem Aufbringen den Hohlraum stützt und vorübergehend trägt. Hierbei entsteht die Verbundkonstruktion Tunnel-Gebirge.⁴¹⁰ Zum anderen kann er zur Profilierung (möglichst glatte Oberfläche) genutzt werden, um die Installation einer ggf. nötigen Kunststoffdichtungsbahn (KDB) zu erleichtern. Die Tunnelauskleidung erfolgt i.d.R. mit einem zweischaligen Ausbau. Die Außenschale besteht aus dem Spritzbeton und ggf. den eingebauten Ankern und Ausbaubögen.

Zu den notwendigen (und an die jeweiligen Anforderungen des Gebirges anpassbaren) Eigenschaften des Spritzbetons zählen:

- schnelle und hohe Frühfestigkeit
- zielsicher erreichte Endfestigkeit
- dichtes Gefüge
- hohe Widerstandsfähigkeit und Dauerhaftigkeit

Zur Erhöhung des Kopfschutzes können (Stahl-)Ausbaubögen oder Gitterträger eingebaut werden, welche zudem im eingespritzten Zustand sofort tragfähig (dienen als Ringbewehrung) und profilgeben sind. Falls die Festigkeit bzw. Tragfähigkeit des Gebirges nicht ausreichend ist, kann der Ausbauwiderstand durch das Einbringen und Vorspannen von Ankern in dreidimensionaler Richtung erheblich gesteigert werden. Auf diese Weise werden die einzelnen Trennflächen und Auflockerungen, welche ggf. durch das Sprengen entstanden sind, miteinander verbunden und die Scherfestigkeit erhöht.⁴¹¹

⁴⁰⁷ Vgl. Maidl et al., 1997, S.117.

⁴⁰⁸ Vgl. Engelhardt, 2016, S.5 ff.

⁴⁰⁹ Für genauere Erläuterungen sei auf u.a. Kolymbas, 1998, S.74 ff. verwiesen.

⁴¹⁰ Vgl. Maidl et al., 1997, S.121.

⁴¹¹ Vgl. Kolymbas, 1998, S. 69 f. und Maidl et al., 1997, S.121 f.

6. Vermessen

Sobald die Sicherung eingebaut ist, wird anhand des DWEP Vermessen die Genauigkeit des Tunnelverlaufs (Ortsbrust und Profil) und die Standfestigkeit überprüft. Hierbei sind zur endgültigen Dimensionierung und zur Überprüfung der Wirksamkeit der gewählten Sicherungsmaßnahmen zu jedem Zeitpunkt Messungen am Bauwerk durchzuführen, um Spannungen und Verformungen zu ermitteln. Nach jedem Abschlag sind die Abweichungen vom geplanten Querschnitt zu erfassen und anhand der (neu) ermittelten felsmechanischen Parameter kann bestimmt werden, ob anhand der Ergebnisse der vorausgegangenen Standsicherheitsuntersuchung die Sicherungsmaßnahmen ausreichenden dimensioniert wurden oder ob ggf. Nacharbeiten ((weitere) Anker oder Sicherungsmaßnahme) zu veranlassen sind. Auf diese Weise kann eine gültige Aussage bzgl. der Standsicherheit des Gebirges ermittelt werden und die Messungen sind fortzuführen, bis auch nach dem letzten Ausbruch die Verformungen gegen Null tendieren.⁴¹²

IWEP / Unterstützungsprozesse Sprengvortrieb

Zu den Unterstützungsprozessen bzw. den Bauhilfsmaßnahmen im Sprengvortrieb können folgende gezählt werden:⁴¹³

- Leitungsbau
- Abtransport Abraum
- Ausbau der Beleuchtung
- Nachziehen der Versorgungsleitungen, insb. Baustrom
- Verlängerung der Lutte
- Nachbau des Fluchtcontainers
- Nachbau von Transportsystem (bei Gleis- oder Bandförderung)
- Sohlräumung
- Fahrbahnbau
- Rampenbau / Rückbau
- Reinigung und Wartung der Gerätschaften
- Kundendienst / Reparatur der Maschinen
- Umbau von Lüftern und Entstaubern
- Erkundungsbohrungen
- Prüfung der Anker
- Materialtransporte
- Wasserhaltung
- Spritzen / Einbauen Abdichtungsträger
- Bau von Nischen und Querschlägen

⁴¹² Vgl. Maidl, 2004(2), S.131 f.

⁴¹³ Es erfolgt lediglich eine Aufzählung der möglichen Unterstützungsprozesse, da eine ausführliche Erläuterung dieser keinen Mehrwert für die Arbeit bedeutet und die Begriffe größtenteils selbst-erklärend sind. Für weitere Informationen sei auf die angegebenen Quellen verwiesen. Vgl. Maidl, 1997, S.190 und Glißmann, 2018, S. 41 ff.

Wert-Box 11: Wert des Sprengvortriebs für die Entwicklung des Prozessmodell

Um zu zeigen, dass das Prozessmodell auch auf andere Verfahren des Tunnelvortriebs adaptierbar ist, ist der Sprengvortrieb als Beispiel geeignet. Im Vergleich zum Vortrieb mit einer TBM sind mit dem Bohren, Sprengen, Bewettern, Schüttern, Sichern und Vermessen mehr DWEP zu erbringen, wobei der Vortrieb weniger kontinuierlich abläuft, sondern eher taktweise. Die DWEP sind teilweise überlappend ausführbar und eine große Anzahl an IWEP kann parallel zu den DWEP erbracht werden. Nichtsdestotrotz haben auch beim Sprengvortrieb Störungen einen erheblichen Einfluss auf die Produktivität der Vortriebsleistung, sollten sie die Ausführung der DWEP dauerhaft stören. Aus diesem Grund und aufgrund der großen Anzahl der zu erbringenden IWEP erscheint die Anwendung des Prozessmodells auch bei dieser Vortriebsmethode als eine sinnvolle Möglichkeit zur Optimierung der Prozessabfolge in insbesondere außerplanmäßigen Situationen.

7 Entwicklung Prozessmodell zur Produktivitätsoptimierung

In den vorstehenden Kapiteln wurden eine allgemeingültige Struktur zur Modellierung komplexer Systeme und die Zielstellungen an ein Prozessmodell zur Optimierung der Produktivität hergeleitet, welche die im Kapitel 4 gestellten Anforderungen an ein Prozessmodell sowie einiger der in Kapitel 5 vorgestellten Lean-Methoden berücksichtigt. Zur Erläuterung der praktischen und allgemeingültigen Entwicklung des Prozessmodelles wurden im Kapitel 6 unterschiedliche Vortriebsverfahren des Tunnelbaus erläutert.

In diesem Kapitel werden die Generierung der für das Prozessmodell notwendigen Daten (Abs. 7.1) und das Vorgehen zur Ermittlung des Leitprozesses im Störfall (Abs. 7.2) dargestellt. Damit die Produktivität des Gesamtprozesses aufgrund eines Stillstandes, verursacht durch eine außerplanmäßige Situation, möglichst geringfügig negativ beeinflusst wird, ist es notwendig, die Kapazität zukünftiger DWEP zu optimieren, womit eine zusätzliche weiterführende Forschungsfrage beantwortet werden soll:

**Ist es möglich,
das verfügbare Potential während eines Stillstandes kurzfristig zu nutzen, um die
Kapazität zukünftiger werterzeugender Prozesse zu optimieren?**

Die aufgrund einer außerplanmäßigen Situation entstandenen Potentiale (Zeit, Personal, Maschinen) können sinnvoll - bzgl. der Gesamtprozessproduktivität - genutzt werden, indem Prozesse, die die Kapazität zukünftiger DWEP negativ beeinflussen, bereits während des aktuellen Stillstandes (ermöglicht durch die neu entstandenen Potentiale) ausgeführt werden. Hierzu werden die Möglichkeiten zur Steigerung der Produktivität durch die Ermittlung und Berücksichtigung paralleler (Abs. 7.3) und zukünftiger (Abs. 7.4) Prozesse, sowie die Möglichkeit zur kontinuierliche Verbesserung mittels Dokumentation (Abs.7.5) dargestellt. Diese ist notwendig, da die Prozesse und deren zukünftiger Einfluss nur bei aktuellen Daten sinnvoll beachtet werden können. Mit dieser Berücksichtigung ist es möglich, eine ergänzende Forschungsfrage zu beantworten:

**Ist es möglich, die in einem Projekt gewonnen Prozessdaten
unmittelbar zu dokumentieren, zu nutzen
und eine kontinuierliche Produktivitätsverbesserung zu erreichen?**

Ein weiteres positives Resultat, was mit der Beantwortung dieser Frage erreicht werden kann, ist die Umsetzung des Kaizen-Prinzips bzw. des Kontinuierliche Verbesserungsprinzips. Mit Hilfe der kontinuierlichen Dokumentation der auftretenden Prozesse werden alle gewonnen Prozessinformationen gesammelt und die im Prozessmodell hinterlegten Daten der Prozesse aktualisiert.⁴¹⁴ Auf diese Weise soll aus Fehlern bzw. Störungen gelernt und diese zukünftig präventiv verhindert bzw. ihr Einfluss eingeplant werden.

Im Abs. 7.6 werden die vorhergehenden Abschnitte zusammengefasst. Die Anwendung verschiedener möglicher Kriterien und Filter zur Prozessauswahl und -anordnung werden im Abs. 7.7 und die Werkzeuge des Prozessmodells im Abs. 7.8 beschrieben.

⁴¹⁴ Einen Ansatz zur Dokumentation und Analyse der Maschinendaten zu einer räumlichen und zeitlichen verknüpften Datenstruktur bietet das System PROCON II der FA. mtc – Maidl Tunnelconsultants GmbH & Co. KG. Vgl. Maidl & Stascheit, 2014.

7.1 Datengenerierung für das Prozessmodell

Mit einem Modell (= vereinfachtes Abbild) wird ein reales System dargestellt, wie bereits im Kapitel 4 erläutert wurde. Um dem Nutzer eine fundierte Entscheidungsunterstützung liefern zu können, sind für dieses Modell die relevanten Daten zu erfassen. Damit die vorgegebene Zielausrichtung des Prozessmodells erreicht werden kann, sind diese relevanten Daten im Vorhinein zu bestimmen, - falls bereits vorhanden - zu erfassen und so aufzubereiten, dass sie zur Optimierung des Bauablaufs generell und speziell im Falle einer Störung (= reales System / Problem) beitragen. Das Prozessmodell kann das reale System nur so gut darstellen, wie es die erfassten Daten zulassen. In der Informatik gibt es hierzu das Sprichwort: „Garbage in, garbage out“ (kurz: GIGO). Mit diesem soll ausgedrückt werden, dass falsche, unvollständige und ungeordnete Daten zu keinem sachlichen Resultat führen können. Auf die Auswahl der Daten, die Datengenerierung und die Datenaufbereitung sollte also besondere Sorgfalt und Wert gelegt werden.

Im Folgenden wird dargelegt, welche Bedeutung die Auswahl der genutzten Daten hat, wie die Daten ermittelt und wie diese anschließend für das Prozessmodell aufbereitet werden.

7.1.1 Datenerfassung

Die Daten für ein Modell können prinzipiell auf primäre oder sekundäre Weise sowie aus internen oder externen Quellen erhoben werden. In diesem Zusammenhang steht primär für Daten, welche extra für die jeweilige Untersuchung ermittelt werden (z.B. direkt aus vergleichbaren Projekten). Bei der sekundären Erhebung werden bereits vorhandene Daten (z.B. aus der Literatur) verwendet. Unter einer internen Quelle ist das eigene Unternehmen (beispielsweise das interne Rechnungswesen) zu verstehen, während eine externe Quelle beispielsweise eine unabhängige Institution wie das statistische Bundesamt sein kann.⁴¹⁵ Für ein Prozessmodell, welches für ein bestimmtes Unternehmen und eine bestimmte Art von Projekt entwickelt werden soll, bietet es sich an, auf primäre Daten aus einer internen Quelle zurückzugreifen.

Hierbei ergeben sich verschiedene Vorteile:

- Die primären Daten aus vergleichbaren Projekten sind als relevant anzusehen, da sie die tatsächlichen, auch zukünftig zu erwartende Prozesse, Abläufe, Probleme und Möglichkeiten wiedergeben.
- Interne Quellen garantieren die Echtheit der erhobenen Daten. Diese können in ihrer rohen Fassung (z.B. ungeschönt, nicht auf- oder abgerundete Werte) die tatsächlichen Problemstellen aufzeigen und somit einen großen Beitrag zur zukünftigen Verbesserung liefern.
- Die Vertrautheit mit dem Aufbau und der Aufbereitung (z.B. Bezeichnungen, Nummerierungen und Farbgebung) der internen Unterlagen (z.B. Bautagesberichte, Protokolle, Maschinenauswertungen) kann die Datenermittlung und -auswahl beschleunigen und vereinfachen.

⁴¹⁵ Vgl. Staudt et al., 1985, S.70 f.

Zur vollumfänglichen Erfassung eines bestimmten Prozesses sollten seine Art, seine Dauer, für seine Erbringung bzw. Behebung notwendigen Ressourcen sowie seine Abhängigkeit zu anderen Prozessen ermittelt werden.

Für ein Prozessmodell sind für jeden Prozess die folgenden Daten zu ermitteln bzw. zu bestimmen:

- Verhältnis bzw. Verbindung zu anderen Prozessen
- notwendige Ressourcen (Personal, Maschinen, Werkstoffe)
- durchschnittliche / abgeschätzte Prozessdauer (je nach verfügbaren Daten)
- Anzahl der direkten Nachfolgeprozesse (= Abhängigkeiten)

7.1.2 Datenaufbereitung und Kennzahlenbildung

Damit das Prozessmodell als eine Hilfestellung verwendet werden kann, indem es dem Nutzer bspw. im Falle einer Störung die sinnvollste Lösung für einen oder mehrere Ausweich- bzw. Parallelprozesse liefert, ist es zwingend notwendig, dass für die einzelnen Prozesse vergleichbare Daten hinterlegt sind. Die Daten müssen hierfür so strukturiert sein, dass sie stets untereinander gegenübergestellt werden können (quantifizierbar) und zu jedem Zeitpunkt mit dem aktuellen Stand der Baustelle hinsichtlich des Bauvorschritts (Ort) und der Bauprozessdauer (Zeit, produktive Arbeitsdauer⁴¹⁶) abgeglichen sind. „Nur was man messen kann, kann man verbessern.“⁴¹⁷ Das Messen ist somit der erste Schritt in Richtung Kontrolle und Verbesserung. Um dies zu erreichen, sind aussagekräftige und eindeutige Kennzahlen zu bilden. Diese haben die Aufgabe in Bezug auf ein bestimmtes Aussageziel, im Vergleich zu anderen Kennzahlen einen bestimmten Aussagewert zu liefern und quantifizieren das Leistungssystem.⁴¹⁸ Kennzahlen sind ein Mittel zur Komplexitätsreduzierung, Kontrolle und Steuerung.⁴¹⁹ Hierbei lassen sich grundsätzlich absolute und relative Kennzahlen unterscheiden, wobei beide Arten im Prozessmodell ihre Anwendung finden:⁴²⁰

Absolute Kennzahlen

Zu den absoluten Kennzahlen zählen Einzelzahlen, Summen und Differenzen sowie verarbeitete Zahlen wie z.B. Mittelwerte. Die absoluten Kennzahlen werden nicht in Relation zu einem anderen Wert betrachtet, sondern alleine ihre tatsächliche Größe im Vergleich zu (einem) anderen Wert(en). Bei Tunnelbauwerken, wie auch bei nahezu allen anderen Bauwerken, ist zu beachten, dass es sich um Unikate handelt, welche durch viele unterschiedliche Parameter (z.B. Querschnitt und Länge des Tunnels, Abbaufähigkeit des Gesteins) beeinflusst werden. Bezogen auf das gesamte Bauwerk ist die Anwendung von absoluten Zahlen als Vergleichskriterium weniger sinnvoll. Bezogen auf einzelne Prozesse können absolute Kennzahlen jedoch zu sinnvollen Vergleichswerten führen.

⁴¹⁶ Die genaue Ermittlung der produktiven Arbeitsdauer bzw. Vortriebsdauer wird in Abs. 8.6.2 erläutert.

⁴¹⁷ Grabner, 2017, S.157. Das Zitat „Wenn man es messen kann, kann man es auch managen und wenn man es nicht messen kann, kann man es auch nicht verbessern“, wird auch Peter Drucker zugeordnet.

⁴¹⁸ Vgl. Staudt et al., 1985, S.24.

⁴¹⁹ Vgl. Langemann, 1999, S.21.

⁴²⁰ Vgl. Staudt et al., 1985, S.25 ff.

Ist bspw. aus mehreren Prozessen der Kürzeste zu ermitteln, spielt nur die absolute Prozessdauer eine Rolle beim Abgleich, nicht z.B. die Prozessdauer im Verhältnis zur Tunnellänge.

Im Prozessmodell werden u.a. die Prozessnummer, die Anzahl der Ressourcen, die Prozessdauer oder die Häufigkeit der Prozesse als absolute Kennzahlen verwendet.

Relative Kennzahlen

Zur Bildung der relativen Kennzahlen (auch Vergleichszahlen) werden absolute Kennzahlen verwendet und diese dabei in ein Verhältnis zu einer spezifischen Bezugzahl gesetzt. Somit können mit relativen Kennzahlen vergleichbare, jedoch nicht notwendigerweise identische Bauwerke oder Prozesse gegenübergestellt werden.

Für den Anwender des Prozessmodells ist von besonderer Bedeutung, wann ein bestimmter Prozess (z.B. geplanter Unterstützungsprozess oder ungeplanter Störprozess, siehe Abs. 7.2) fällig bzw. wahrscheinlich wird. Die unterschiedlichen Prozesse können nach einer bestimmten Zeit⁴²¹ oder nach einer bestimmten Baulänge⁴²² notwendig werden.

Der Wert der „zyklische Fälligkeit“ jedes einzelnen Prozesses wird ins Verhältnis zur spezifischen Bezugsgröße des aktuellen Tunnelvortriebs (Ort oder Zeit) gesetzt. Dieser Wert wird anschließend auf eine einheitliche Normskala umgerechnet. Die hierdurch entstehenden absoluten Werte können miteinander verglichen werden. Für jeden Prozess wird die aktuelle zyklische Fälligkeit - bezogen auf den Ort oder die Zeit des Vortriebs - ermittelt (relative Kennzahl) und durch Umrechnung auf die Normskala eine absolute Kennzahl zum Abgleich der Prozesse geschaffen.

Das genaue Verfahren zur Ermittlung der Fälligkeiten wird in Abs. 7.7.2 erläutert.

⁴²¹ Z.B. tritt alle 20.000 bis 25.000 Arbeitsminuten ein Defekt an einer bestimmten Maschine auf. Diese sollte also zu Beginn dieses Zeitraums präventiv kontrolliert werden.

⁴²² Z.B. sind die Kabel für eine Betonpumpe alle 40 bis 60 Meter zu verlängern.

7.2 Leitprozessermittlung im dritten Schritt der Produktivitätssteigerung

Wie im Kapitel 3 dargestellt wurde, lässt sich die Optimierung der Prozesse zur Steigerung der Produktivität und zur Steigerung der Gesamtprozesskapazität unter Berücksichtigung der drei Prozesskategorien (Direkt Werterzeugende Prozesse (DWE) / Schlüsselprozesse (SP), Indirekt Werterzeugende Prozesse (IWE) / Unterstützungsprozesse (UP) Nicht-Werterzeugende Prozesse (NWE) / Störprozesse (StP)) auf drei Schritte aufteilen. Die ersten beiden Schritte sind unter Berücksichtigung der Randbedingungen und Unsicherheiten weitgehend planbar, da die notwendigen Prozesse bekannt sind. Der dritte Schritt bedingt die Steuerung, da hierbei ungeplante Prozesse, die außerplanmäßigen NWE (zur Behebung von Störungen), welche die Werterzeugung verhindern, berücksichtigt werden. Hierbei sind die Abhängigkeiten aller Prozesse neu zu analysieren und die Abfolge bzw. Anordnung und Ressourceneinteilung zu optimieren, sodass alle DWE gemäß der maximalen Kapazität ausgeführt werden können.

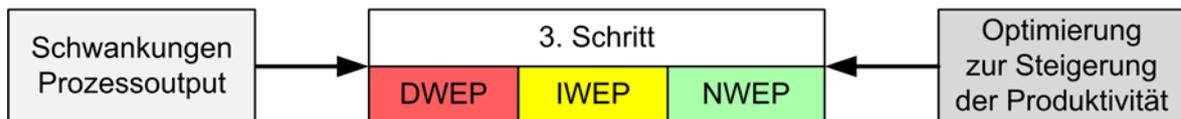


Abb. 41: Dritter Schritt zur Produktivitätssteigerung

Um zu jedem Zeitpunkt klären zu können, welcher Prozess Priorität hat, also auszuführen ist, damit der Gesamtprozess optimiert wird, wurde der Begriff des **Leitprozesses** (LP) eingeführt.

Definition Leitprozess (LP)

*Ist die Ausführung eines DWE **möglich**, so ist dieser der Leitprozess. Ist die Ausführung eines DWE **nicht** möglich, ist der Prozess, welcher die Ausführung eines DWE verhindert, der Leitprozess. Dieser kann entweder ein notwendiger IWE oder ein NWE (Behebung einer Störung) sein. Die Ausführung des Leitprozesses hat die **höchste Priorität**.*

Zur Veranschaulichung soll als Beispiel der Sprengvortrieb (= konventionelle Tunnelvortrieb, vgl. Kapitel 6.4.2) dienen.

Beispiel Ermittlung des Leitprozesses im Sprengvortrieb

DWEP Sprengvortrieb:

- Bohren
- Sprengen
- Bewettern
- Schuttern
- Sichern
- Vermessen

IWEP Sprengvortrieb (Auszug):

- Leitungsbau
- Sohlräumung
- Fahrbahnbau
- Nachziehen
Versorgungsleitungen
- Reinigung und Wartung
Gerätschaften
- Verlängerung Lutte
- Entleeren Abraumdeponie

NWEP Sprengvortrieb (Auszug):

- Behebung von Betriebsstörungen / defekter Maschinen.
- Beschaffung von / Suche nach fehlender Betriebsmittel / Werkstoffe.
- Wartezeiten wegen Verzögerungen / inoffizieller Pausen / Personalabwesenheit.
- Wartezeit wegen besonderer Ereignisse (Hebungen, Wetter, Hochwasser).
- Nacharbeiten / Mängelbehebung.
- Ausführung eines IWEP, der nicht notwendig ist und einen DWEP stört.

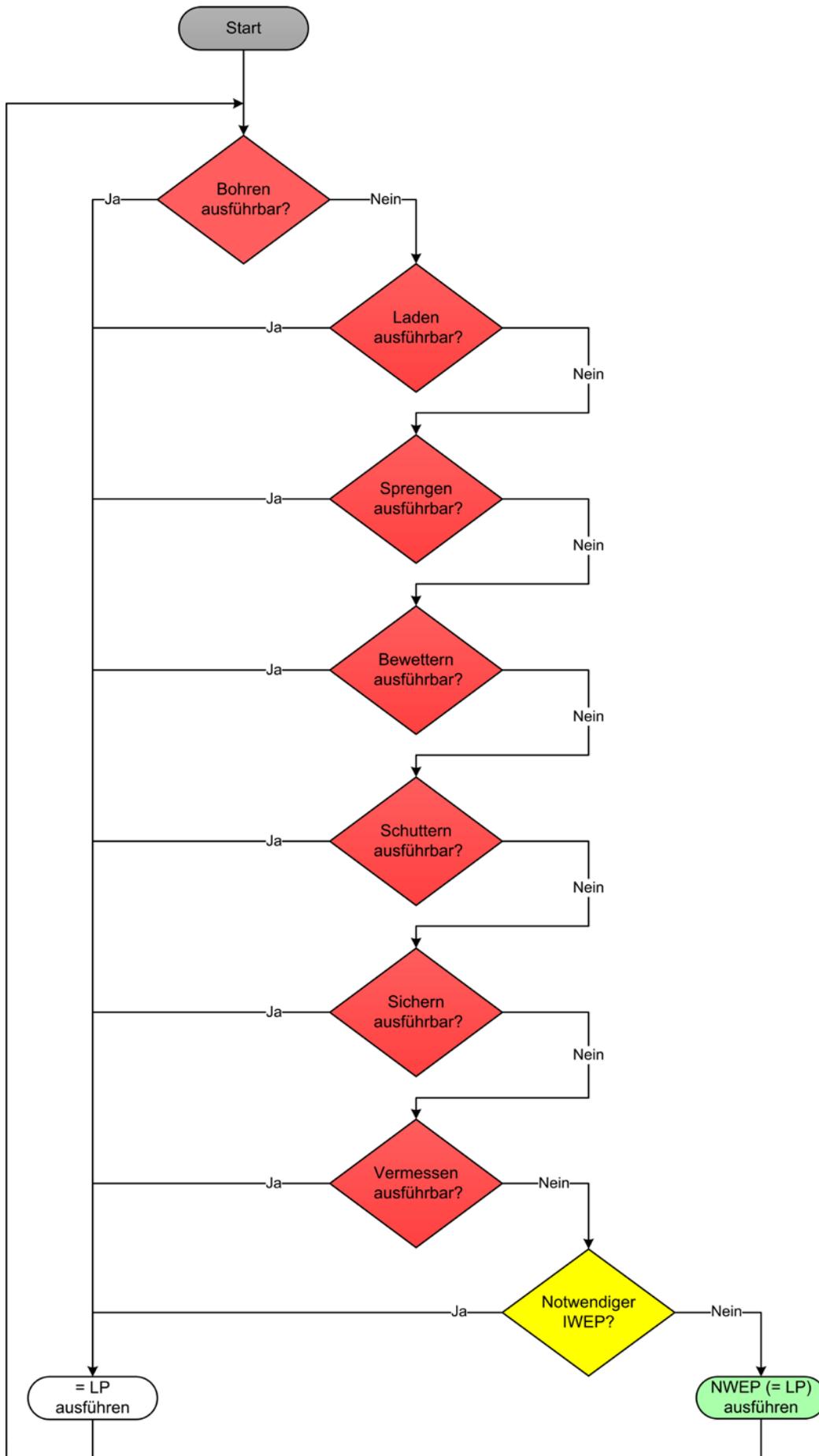


Abb. 42: Flussdiagramm zur Ermittlung des Leitprozesses im Sprengvortrieb

7.3 Parallele Ausführung DWEP und IWEP

Die DWEP liegen i.d.R. auf dem Kritischen Weg und sind nacheinander (in Normalfolge) in einer bestimmten Reihenfolge zu erbringen. Allerdings kann es bei bestimmten Bauverfahren möglich sein, auch die DWEP parallel bzw. überlappend auszuführen, um die Gesamtkapazität zu erhöhen, was den zweiten Schritt zur Produktivitätsoptimierung darstellt. Im Sinne der Priorisierung des Leitprozesses (LP) wurden bisher nur die notwendigen und nicht parallel durchführbaren IWEP betrachtet. Auch diese können teilweise parallel zu einem DWEP ausgeführt werden, solange sie diesen nicht stören (Ressourcen, Platz, Lärm, etc.). Zur Veranschaulichung soll als Beispiel erneut der Sprengvortrieb (= konventionelle Tunnelvortrieb) dienen.

DWEP Sprengvortrieb:

- Bohren
- Sprengen
- Bewettern
- Schüttern
- Sichern
- Vermessen

IWEP (UP) Sprengvortrieb (Beispiele):

- Leitungsbau
- Sohlräumung
- Fahrbahnbau
- Nachziehen
Versorgungsleitungen
- Reinigung und Wartung
Gerätschaften
- Verlängerung Lutte
- Entleeren Abraumdeponie

Im Kapitel 6.4.2 ist dargestellt in welchen Bereichen Überlappungen der DWEP möglich sind. Diese werden im folgenden Flussdiagramm berücksichtigt und für jeden Prozess überprüft, ob ein DWEP oder ein IWEP parallel ausgeführt werden kann.

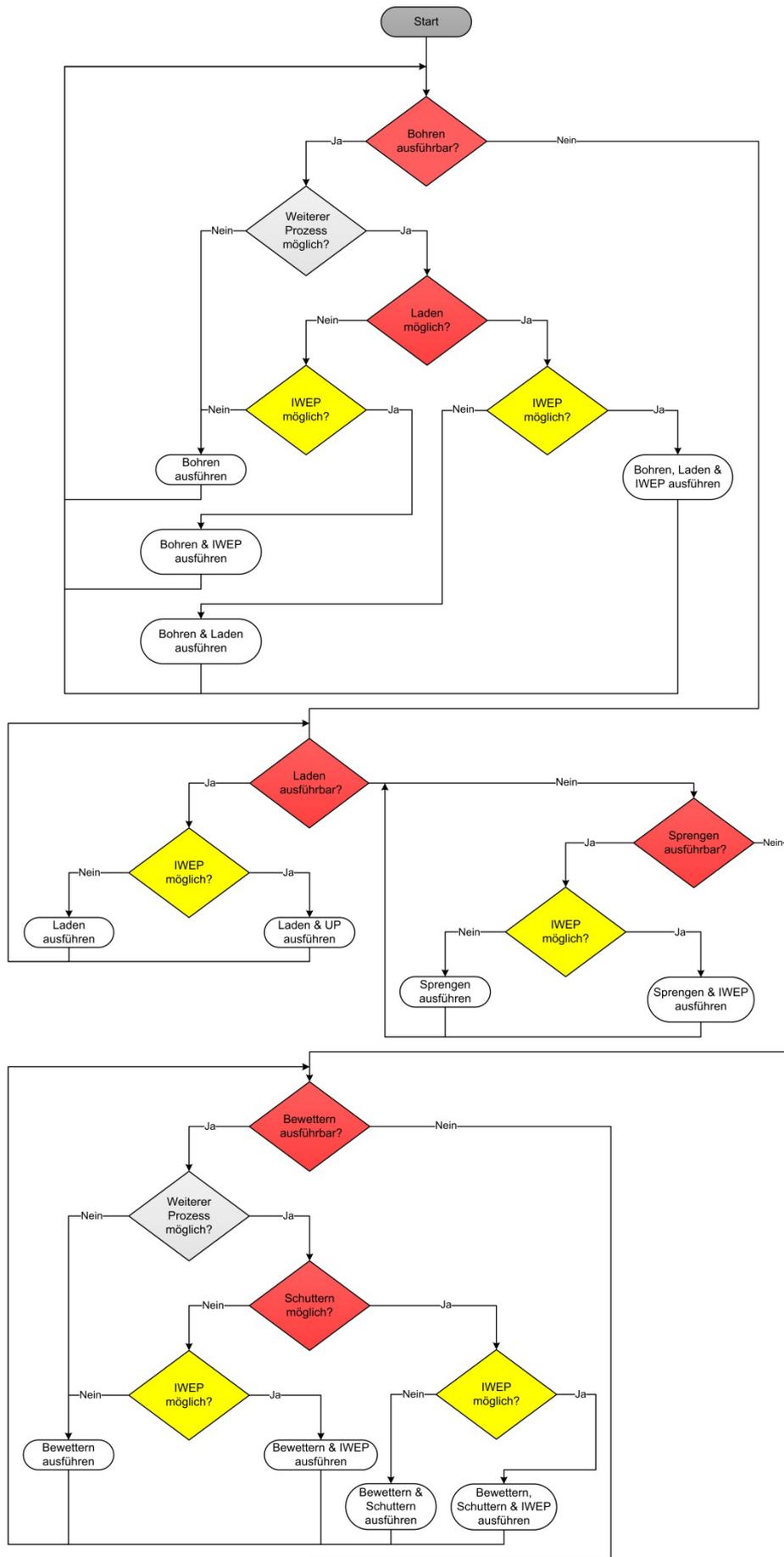


Abb. 43: Flussdiagramm Ermittlung von Parallelprozessen im Sprengvortrieb - Teil 1

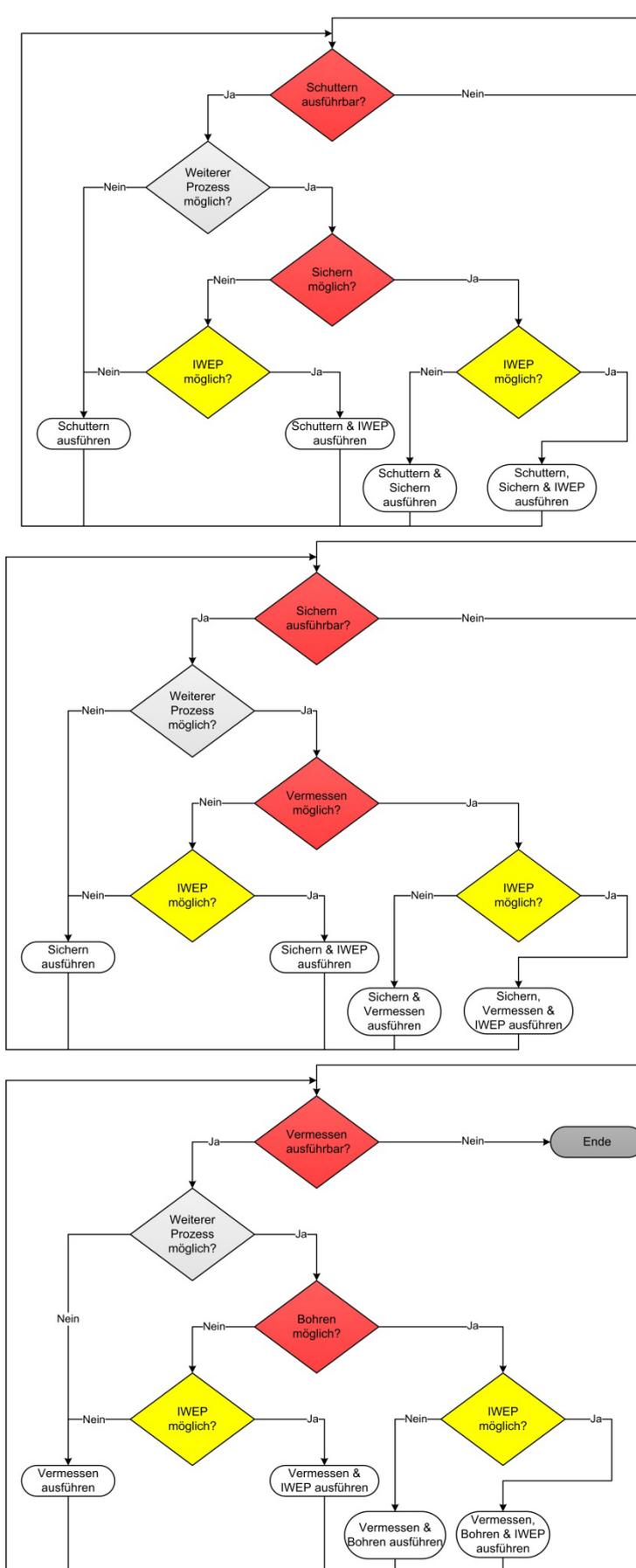


Abb. 44: Flussdiagramm Ermittlung von Parallelprozessen im Sprengvortrieb - Teil 2

7.4 Ermittlung zukünftiger IWEP und NWEPE

Mit dem Prozessmodell soll zum einen die Ausführung und die Anordnung der DWEP und der IWEP (= Erster und zweiter Schritt zur Produktivitätssteigerung) optimiert werden und zum anderen sichergestellt werden, dass die im Falle einer Störung (= Notwendiger NWEPE) die hierbei freigewordene Ressourcen optimal genutzt werden (= Dritter Schritt zur Produktivitätssteigerung).

Wie in Abs. 7.2 dargestellt, wird hierzu erstens zu jedem Zeitpunkt des Stillstandes der zu priorisierende Prozess (= Leitprozess) bestimmt, damit die DWEP nach diesem Stillstand wieder gemäß ihrer maximal möglichen Kapazität ausgeführt werden können.

Zweitens sind während des Stillstandes weitere zukünftige, die Kapazität der DWEP verringernde Stillstände (verursacht durch IWEP oder NWEPE) zu ermitteln, um diese, falls möglich, bereits in der Zeit des aktuellen Stillstandes (= parallel zum aktuellen Leitprozess) auszuführen. Hierzu werden mit dem Prozessmodell, im Falle eines Stillstandes, alle parallel zum stillstandverursachenden Prozess (= LP), ausführbaren Parallelprozesse mithilfe verschiedener Kriterien ermittelt (siehe Abs. 7.7.1) und diese bezüglich ihres zukünftigen (möglichen) Einflusses, mithilfe verschiedener Filter geordnet (siehe Abs. 7.7.2). Ist eine vorgezogene Ausführung dieser Prozesse bereits während des aktuellen Stillstandes möglich, kann somit ihre zukünftige (negative) Beeinflussung der DWEP reduziert bzw. verhindert werden. Erfolgt die präventive Kontrolle bzw. Wartung eines möglichen NWEPE, wird dieser begrifflich zu einem IWEP, da durch die Kontrolle bzw. Wartung ein Wert erhalten bzw. die Wertverhinderung durch einen NWEPE abgewendet wird.

Der Ablauf des Prozessmodells wird im Abs. 7.7 erläutert, das Ablaufschema der vorgezogenen Ausführung zukünftiger IWEP (bzw. NWEPE) ist im folgenden Flussdiagramm dargestellt.

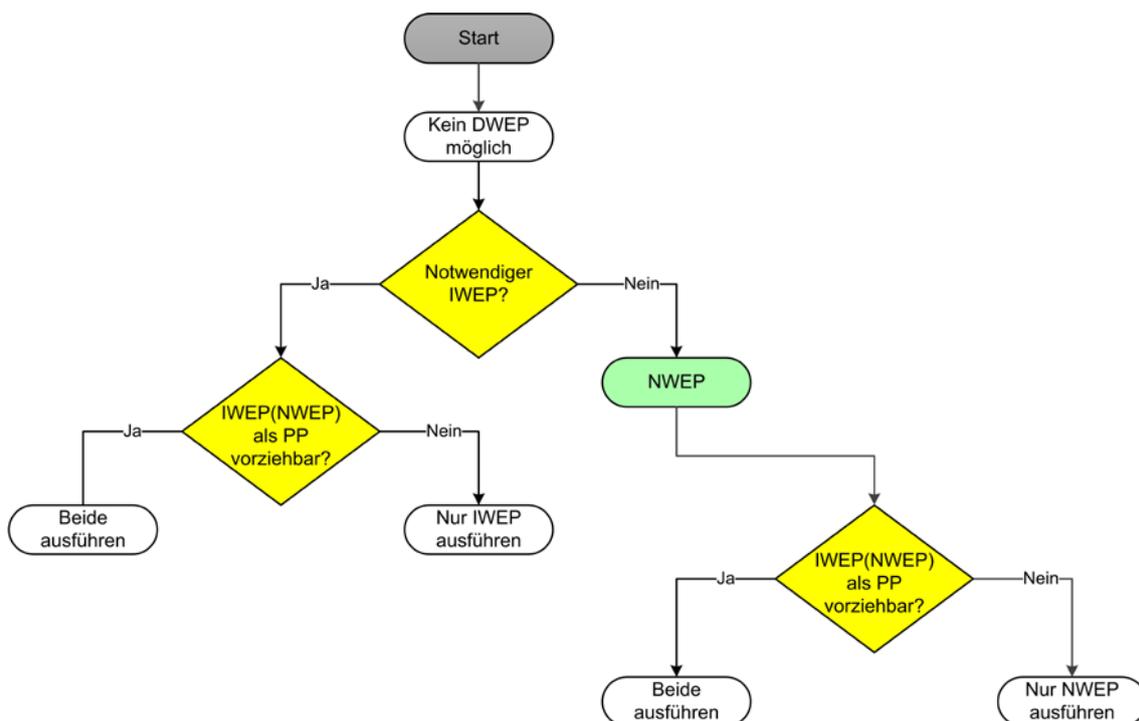


Abb. 45: Flussdiagramm Ermittlung zukünftigen IWEP und NWEPE

7.5 KVP des Prozessmodells durch Dokumentation

Im Sinne des im Kapitel 5.3.6 beschriebenen „Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses“ (KVP), sollen mit Hilfe des Prozessmodells die Stillstände bzgl.:

- Ursache,
 - Häufigkeit,
 - Dauer und
 - Ressourcenverbrauch
-
- ermittelt,
 - analysiert,
 - dokumentiert und
 - zukünftig berücksichtigt werden.

Es werden sowohl bereits bekannte IWEP und NWEP als auch neu auftretende Störungen (und folglich NWEP) berücksichtigt, erfasst und dokumentiert. Anhand der ermittelten Daten werden zukünftig (kurzfristig, innerhalb des Projektes; langfristig, für folgende Projekte) die stillstandverursachenden Prozesse zunehmend genauer berücksichtigt, um die Kapazität der DWEP zu optimieren und Verschwendungen zu minimieren bzw. gänzlich zu eliminieren. Es werden die bei einem Projekt neu ermittelten Daten dokumentiert (digital zusammengestellt), die im Prozessmodell hinterlegten Daten anhand dieser neuen Daten umgehend aktualisiert und somit die projektspezifischen Daten noch innerhalb des Projektes (bereits bei der nächsten Leitprozessauswahl) genutzt. Das Ablaufschema zur Dokumentation ist in folgendem Flussdiagramm dargestellt.

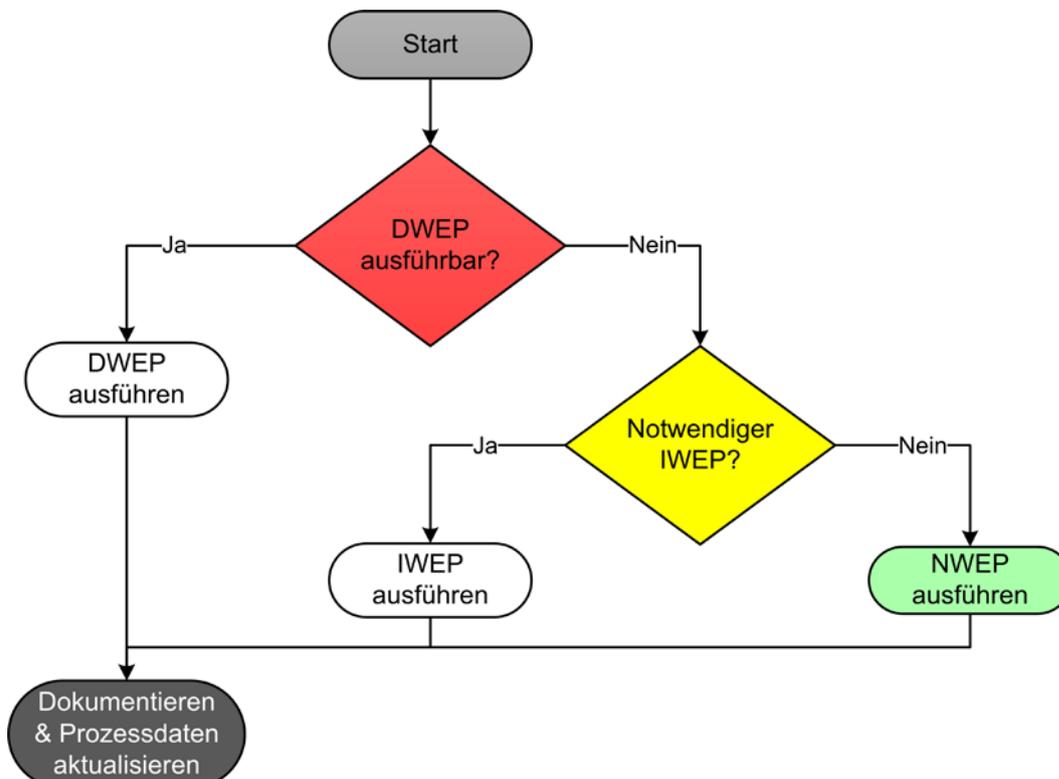


Abb. 46: Flussdiagramm - KVP durch Dokumentation der Prozesse

7.6 Zusammenfassung Parallelprozessauswahl und Dokumentation

Wie in Abs. 7.2 dargestellt, können zu jedem Zeitpunkt im Gesamtprozess einzelne Prozesse der drei unterschiedlichen Kategorien auftreten (geplant oder ungeplant). Anhand der Definition des Leitprozesses ist eindeutig ermittelbar, welcher Prozess zu diesem spezifischen Zeitpunkt Priorität hat, also auszuführen ist. In Abb. 47 sind alle Ziele, die mit dem Prozessmodell erreicht werden sollen, in ein Gesamtablaufschema eingearbeitet. Durch die Befolgung dieses Schemas wird Folgendes sichergestellt:

- Die DWEP sind gemäß ihrer maximal möglichen Kapazität ausführbar.
- Zu jedem Zeitpunkt ist der zu priorisierende Prozess (= Leitprozess) herausstellbar.
- Weitere mögliche DWEP und ggf. zukünftige, die Kapazität der DWEP verringernde Prozesse (IWEP / NWEPE) werden erkannt und diese werden, falls möglich, parallel ausgeführt.
- Während eines Stillstands werden weitere zukünftige, die Kapazität der DWEP verringernde, stillstandverursachende Prozesse (IWEP / NWEPE) erkannt und diese werden in der Zeit des aktuellen Stillstandes, falls möglich, parallel ausgeführt.
- Die neu gewonnenen Daten aller Prozesse werden umgehend vollumfänglich dokumentiert und zukünftig berücksichtigt.

Wie ermittelt wird, ob die parallele Ausführung weiterer Prozesse während eines Stillstands möglich und sinnvoll ist, wird im folgenden Abs. 7.7 erläutert.

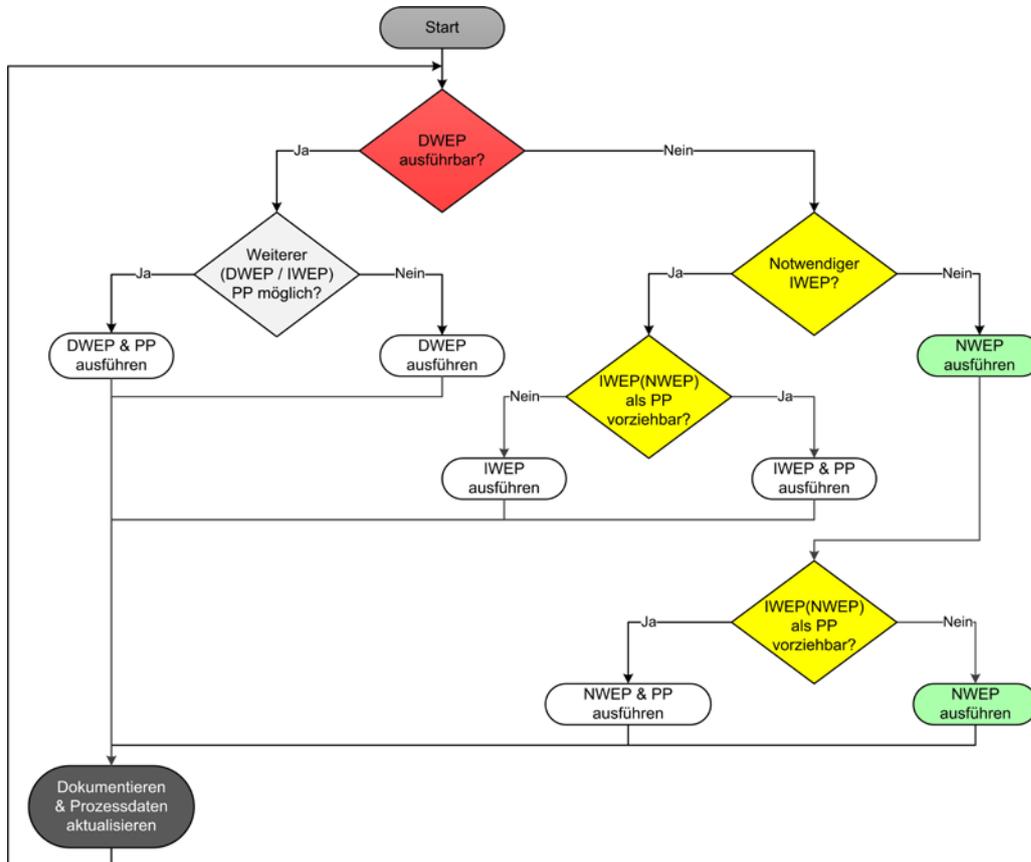


Abb. 47: Flussdiagramm Zusammenfassung Parallelprozesse und Dokumentation

7.7 Kriterien und Filter des Prozessmodells - Störfall

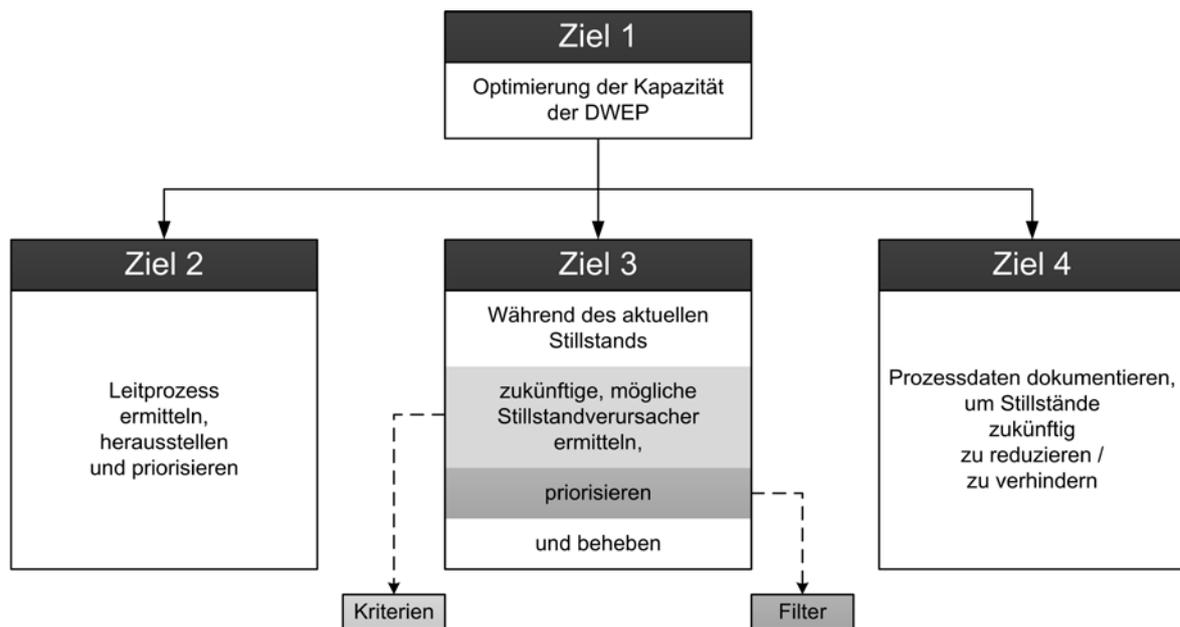


Abb. 48: Zielsystem Prozessmodell

Mit dem Prozessmodell soll die Produktivität der Bauproduktion optimiert werden. Hierfür ist das angestrebte übergeordnete Ziel, die Kapazität der DWEP zu optimieren, indem der jeweilige Leitprozess herausgestellt und priorisiert wird. Es werden Prozesse ermittelt, die - auch während eines Stillstandes - unter den gegebenen Bedingungen (Dauer, Ressourcen, Platz, Lärm, etc.) parallel ausführbar sind und ggf. zukünftig ebenfalls einen Stillstand verursachen und die Kapazität der DWEP reduzieren könnten.

Jede Baustelle, jedes Bauverfahren und jedes Projekt ist individuell und der jeweilige, aktuelle Zustand des Projektes hat ebenfalls einen bedeutenden Einfluss auf die Prozesse. Um zu ermitteln, ob aktuell die parallele Ausführung weiterer Prozesse während eines stillstandverursachenden Prozesses möglich und sinnvoll ist, werden verschiedene Abhängigkeiten und Kennzahlen abgefragt.

In einem ersten Schritt werden die Prozesse ermittelt, deren Ausführung parallel **möglich** ist. Dies geschieht anhand verschiedener **Kriterien** (Abs. 7.7.1). Ist mehr als ein Prozess möglich, werden diese Prozesse in einem zweiten Schritt bzgl. ihres zukünftigen Einflusses auf die DWEP **sinnvoll** anhand von **Filtern geordnet** (= priorisiert) (Abs. 7.7.2). Diese mit dem Prozessmodell für die individuelle Situation ermittelte Liste dient dem verantwortlichen Personal als Entscheidungshilfe. Ob die möglichen Prozesse tatsächlich vorgezogen werden, ist dann von diesem zu entscheiden.

Der Ablauf dieses Algorithmus und die hierfür notwendigen Abfrageparameter (Kriterien und Filter) werden in den folgenden Abschnitten erläutert, in Abb. 49 ist das Ablaufschema dargestellt.

Ablauf Prozessmodell

Allgemeine Angaben bzgl. der Baustelle / des Projekts (Projektname, der Start der Bauproduktion, verfügbare Ressourcen) sind zu Beginn der Bauarbeiten im Zuge der Arbeitsvorbereitung im Prozessmodell zu hinterlegen, ebenso wie spezifische Angaben bzgl. der Prozesse (Technische Möglichkeit zur Ausführung parallel zu anderen Prozessen, Prozessdauer, Ressourcenverbrauch, Abhängigkeiten, Häufigkeit, zyklische Fälligkeit). Diese können aus einem früheren, vergleichbaren Projekt übernommen werden, sind jedoch zu kontrollieren und ggf. auf das jeweilige Projekt anzupassen.

Um Prozesse zu ermitteln, deren Ausführung parallel zum aktuellen, den Stillstand verursachenden Prozess **möglich** und **sinnvoll** ist, laufen die folgenden vier Schritte ab:

1. Die Angaben bzgl. des aktuellen Baustellenzustandes (Ort und Zeit) und Datum werden automatisch aktualisiert oder sind manuell während des Baubetriebes einzutragen.
2. Es ist der Grund für den Stillstand zu bestimmen (= Leitprozess).
3. Zur Ermittlung der Prozesse, welche parallel zum aktuellen, den Stillstand verursachenden Prozess ausführbar sind (PP), erfolgt eine Kriterienabfrage (Abs. 7.7.1) und eine Filterabfrage (Abs. 7.7.2) nach den definierten Vorgaben. Hierzu ist im Prozessmodell individuell bestimmbar, welche Kriterien und Filter angewendet werden sollen. Auch diese Vorgaben sind, falls eine Anpassung nötig ist, vor dem Baubeginn zu korrigieren.
4. Eine Entscheidung über die Sinnhaftigkeit und die Veranlassung der Parallelprozesse (PP) erfolgt durch das verantwortliche Personal.

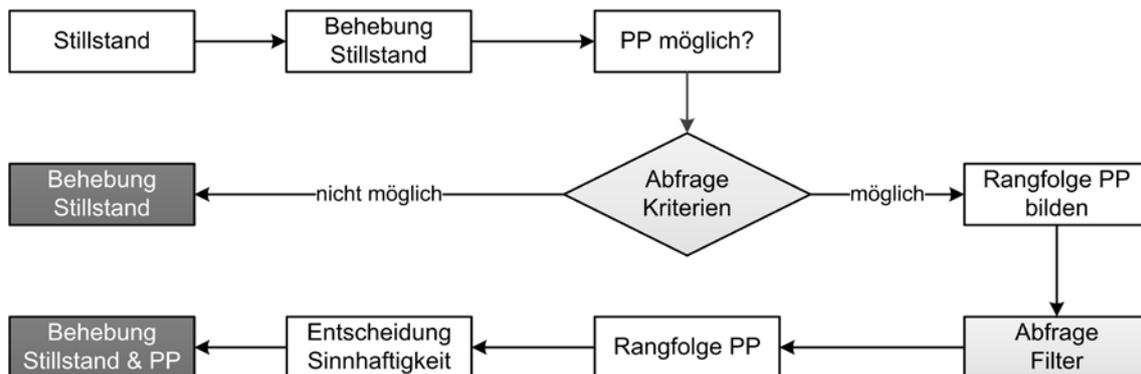


Abb. 49: Ablaufschema Prozessmodell - Ermittlung Parallelprozesse (PP)

7.7.1 Kriterien

Mit Hilfe der Kriterien wird ermittelt, welche Prozesse parallel zum aktuellen, den Stillstand verursachenden Prozess ausführbar sind. Es wird hierbei ein Abgleich mit dem aktuellen Zustand der Baustelle bzgl. der laufenden Prozesse⁴²³, der Ressourcen in Verwendung, der insgesamt verfügbaren Ressourcen, des Ortes des Baufortschritts⁴²⁴ (Meter), der Dauer der Arbeiten (produktive Arbeitszeit) und der Dauer des aktuellen Leitprozesses vorgenommen. Alle hinterlegten Prozesse stehen in einer Liste zur Abfrage zur Verfügung. Mit dieser wird ein Kriterium nach dem anderen abgefragt und die Prozessdaten mit den aktuellen Daten der Baustelle abgeglichen. Die Reihenfolge der ausgewählten Kriterien ist von keiner Bedeutung, da alle definierten Kriterien erfüllt werden müssen, damit ein Prozess parallel ausführbar ist. Die Auswahl und Anzahl der Kriterien kann für jedes Projekt individuell angepasst werden.

Ablauf Kriterienabfrage

Um Prozesse zu ermitteln, deren Ausführung parallel zum aktuellen, den Stillstand verursachenden Prozess (= Leitprozess, LP) **möglich** ist, sind folgende Schritte notwendig:

- Die Angaben bzgl. des aktuellen Baustellenzustandes (Ort und Zeit) und Datum (werden automatisch aktualisiert oder sind manuell einzutragen) sind zu kontrollieren.
- Der LP ist auszuwählen.

Es können beliebig viele Kriterien definiert werden. Die einzige Voraussetzung, welche diese Kriterien zu erfüllen haben sind abgleichbare Kennzahlen, die für die jeweiligen Prozesse hinterlegt sind. Im Folgenden wird die Abfolge mit drei Kriterien erläutert.

Wird das Prozessmodell gestartet, läuft die Kriterienabfrage automatisch wie in Abb. 50 dargestellt, nach folgenden Schritten ab:

1. Die Kriterien werden ausgehend vom ausgewählten LP nacheinander abgefragt. Als Ausgangsbasis steht eine Liste aller bekannten und dokumentierten Prozesse zur Verfügung. Um als Parallelprozess in Betracht gezogen zu werden, müssen alle definierten Kriterien erfüllt sein.
2. Die Liste wird anhand vom ersten Kriterium abgefragt.
3. Erfüllt ein Prozess das erste Kriterium nicht, so fällt er aus dieser Liste heraus. Erfüllt kein Prozess das erste Kriterium, so ist kein Prozess parallel möglich.
4. Erfüllt mindestens ein Prozess das erste Kriterium, so bildet / bilden diese(r) Prozess(e) die Liste, welche anhand vom zweiten Kriterium abgefragt wird.
5. Erfüllt ein Prozess das zweite Kriterium nicht, so fällt er aus dieser Liste heraus. Erfüllt kein Prozess das zweite Kriterium, so ist kein Prozess parallel möglich.

⁴²³ Eine Erweiterung des Modells sollte auch weitere Prozesse auf der Baustelle, welche planmäßig parallel ausgeführt werden und Ressourcen verbrauchen, berücksichtigen. Dieser Ansatz kann beispielsweise für den konventionellen Tunnelbau sinnvoll sein.

⁴²⁴ Nur bei Linienbaustellen, wie Straßen-, Brücken oder Tunnelbaustellen sinnvoll.

6. Erfüllt mindestens ein Prozess das zweite Kriterium, so bildet / bilden diese(r) Prozess(e) die Liste, welche anhand vom dritten Kriterium⁴²⁵ abgefragt wird.
7. Erfüllt ein Prozess das dritte Kriterium nicht, so fällt er aus dieser Liste raus. Erfüllt kein Prozess das dritte⁴²⁶ Kriterium, so ist kein Prozess parallel möglich.
8. Erfüllt exakt ein Prozess das dritte Kriterium, so wird dieser Prozess als einziger, möglicher Parallelprozess angezeigt.
9. Erfüllen mehr als ein Prozess das dritte⁴²⁷ Kriterium, so sind diese in einem weiteren Schritt anhand von Filtern zu priorisieren (Abs. 7.7.2), um zu ermitteln, für welchen dieser Prozesse das vorgezogene Ausführen am sinnvollsten ist.⁴²⁵

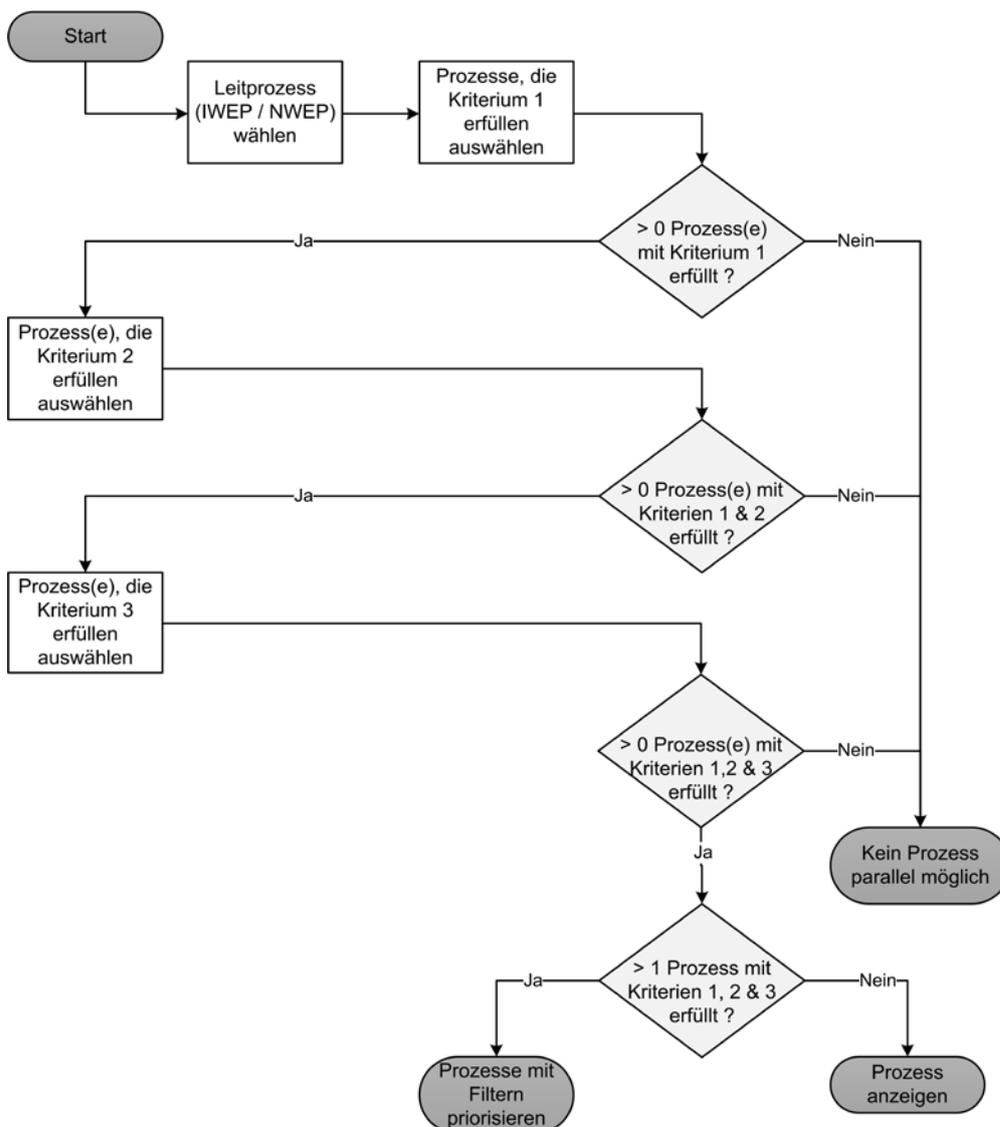


Abb. 50: Ablaufschema Kriterienabfrage

⁴²⁵ Es können beliebig viele Kriterien definiert werden, die einzige Voraussetzung sind abgleichbare Kennzahlen, die für die jeweiligen Prozesse hinterlegt sind.

⁴²⁶ Sollten mehr als drei Kriterien definiert worden sein, gilt diese Aussage für das letzte Kriterium. Der Ablauf bleibt gleich.

⁴²⁷ Bzw. n-te Kriterium.

Die Kriterienabfrage ist nur mit absoluten Kennzahlen möglich, da nur diese eindeutig miteinander verglichen werden können. Die auszuwählenden Kriterien sollten dem Zielsystem des Prozessmodells zuträglich sein, indem sie die Optimierung des Baustellenablaufs unterstützen und hierbei die Priorisierung des Leitprozesses fördern. Prozesse, welche aufgrund der Randbedingungen der Baustelle nicht parallel ausführbar sind (Störung des Leitprozesses), müssen mit den Kriterien konsequent ausgeschlossen werden. Ausschlussgründe können die begrenzenden Ressourcen (z.B. Arbeitskräfte, Maschinen, Informationen, Arbeitsmittel, Geld), die für einen Parallelprozess verfügbare Zeit oder technisch einschränkende Faktoren sein. Um diese technisch einschränkenden Faktoren berücksichtigen zu können, müssen sie in Kennzahlen bzw. Verknüpfungen umgewandelt werden. Beispielweise sind zwei Prozesse ggf. aufgrund des Platzangebots oder der Lärmentwicklung nicht parallel ausführbar. Für einen solchen Fall wird der jeweils andere Prozess zur Kennzahl des betrachteten Prozesses und ist mit ihm auf diese Weise direkt verknüpft, wie im folgenden Kriterium beispielhaft dargestellt wird.

Kriterium Technische Möglichkeit

Beispiel

Prozess X und Prozess Y sind aufgrund des geringen Platzangebots nicht parallel ausführbar. Prozess X und Prozess Z sind aufgrund der Lärmentwicklung von Prozess X nicht parallel ausführbar. Prozess Y und Prozess Z sind parallel ausführbar, sowohl der Platz ist für beide ausreichend und es gibt keine behindernde Lärmentwicklung.

Ausgewählter Leitprozess	Mögliche(r) Parallelprozess(e)
Prozess X	-
Prozess Y	Prozess Z
Prozess Z	Prozess Y

Tabelle 3: Beispiel für das Kriterium der „technisch einschränkenden Faktoren“

Weitere Beispiele für technisch einschränkende Faktoren sind die folgenden:

- Raumverfügbarkeit
- räumliche Reihenfolge
- zeitliche Reihenfolge
- Sicherheitsaspekte
- Lärmentwicklung
- Hitze- / Kälteentwicklung
- Wasserandrang
- Luftdruck (z.B. bei Luftgestützter Ortsbrust)
- Zeitliche Vorgaben (z.B. Arbeitsverbot am Sonntag)
- Persönliche Vorgaben (z.B. vom Bauherrn)
- Persönliche Einschätzung (z.B. vom ausführenden Personal)

Kriterium Ressourcen

Weitere, zu beachtende Kriterien können verschiedene Arten von begrenzenden Ressourcen sein. Ressourcen sind i.d.R. aus Kostengründen möglichst knapp bemessen und die vollständige Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Ressourcen ist anzustreben. Durch die Verwendung dieser wird Wert geschaffen und es entstehen weniger Kosten (Lagerkosten, Personalkosten). Jedoch ist ein zu bestimmender Puffer der Ressourcen nötig, um die Priorisierung des Leitprozesses (insbesondere der DWEP) zu jeder Zeit garantieren zu können. Auch eine zu hohe Ressourcenbeanspruchung widerspricht dem Zielsystem des Prozessmodells, da auf diese Weise Störungen des jeweiligen Leitprozesses drohen, wodurch die DWEP nicht gemäß ihrer Kapazität ausführbar sind.

Die begrenzenden Ressourcen können sich von Projekt zu Projekt bzw. von Projektart zu Projektart unterscheiden. Sowohl materielle (Maschinen, Werkzeuge oder Werkstoffe) als auch immaterielle (Arbeitskräfte, Informationen oder Kapital) Bauproduktionsfaktoren können einen begrenzenden Einfluss haben.

Mit dem Kriterium „Ressourcen“ werden Prozesse aus der Liste der potentiellen Parallelprozesse ausgeschlossen, für welche (nach dem Abgleich mit den insgesamt zur Verfügung stehenden Ressourcen und den für die Ausführung des aktuellen Leitprozesses benötigten Ressourcen) nicht mehr ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen.

Beispiel

Im folgend dargestellten Beispiel sind im linken oberen Kasten alle auf der Baustelle verfügbaren Ressourcen für die Abteilung 1 dargestellt. Es sind hierbei zwei Maschinen, fünf Werkstoffe und zwei Facharbeiter vorhanden.

Die für die Behebung des Störprozesses (= Leitprozess) benötigten Ressourcen sind im Kasten rechts oben dargestellt. Zur Behebung werden eine Maschine, drei Werkstoffe und ein Facharbeiter benötigt.

Die bisherige Kriterienabfrage hat ergeben, dass die zwei Prozesse (X und Y) parallel zum Leitprozess ausführbar sind. Für Prozess X (grün, links unten) sind genug Ressourcen übrig. Seine Ausführung benötigt eine Maschine, zwei Werkstoffe und einen Facharbeiter. Für die Ausführung von Prozess Y (rot, rechts unten) werden hingegen zwei Facharbeiter benötigt. Diese Menge ist nicht mehr verfügbar, Prozess Y erfüllt das zweite Kriterium nicht, weshalb nur Prozess X als Parallelprozess möglich ist.

Verfügbare Ressourcen Baustelle			Verbrauch Ressourcen Störprozess (= Leitprozess)		
Maschine 1	Werkstoffe 1	Facharbeiter 1	Maschine 1	Werkstoffe 1	Facharbeiter 1
2	5	2	1	3	1
Verbrauch Ressourcen Prozess X			Verbrauch Ressourcen Prozess Y		
Maschine 1	Werkstoffe 1	Facharbeiter 1	Maschine 1	Werkstoffe 1	Facharbeiter 1
1	2	1	1	2	2

Abb. 51: Beispiel Kriterium Ressourcen

Kriterium Prozessdauer

Auch die Prozessdauer kann als Kriterium genutzt werden. Mit diesem können Prozesse als mögliche Parallelprozesse ausgeschlossen werden, für die eine größere Prozessdauer zu erwarten ist, als für den aktuellen Leitprozess erwartet wird. Die Ausführung eines Parallelprozesses, der länger als der Leitprozess dauert, steht im Gegensatz zur Zielforderung der Priorisierung des Leitprozesses. Der Parallelprozess würde selbst zu einer (neuen) Störung werden, da er die Ausführung der DWEP (werden nach der Ausführung des IWEP oder NWEF i.d.R. zum Leitprozess) oder die Behebung einer anschließenden Störung verhindert.

Im Prozessmodell wird die für den aktuellen Leitprozess erwartete Dauer (deterministisch) automatisch ausgegeben. Die den Prozessen zugeordneten Dauern können aus Erfahrungswerten gebildet (Daten vergleichbarer Projekte, z.B. Mittelwert), simuliert (probabilistische Wertebereiche⁴²⁸) oder individuell (z.B. durch Experten, Bauleiter, Schichtführer) bestimmt werden.

Die Dauer des Leitprozess sollte vom verantwortlichen Personal überprüft und ggf. der Situation (Maß der Störung) angepasst werden.

Beispiel

Das folgende in Abb. 52 dargestellte Beispiel zeigt vier mögliche Fälle, wie die hinterlegten Prozessdauern individuell an die jeweilige Situation angepasst werden können:

- Die bisherige Kriterienabfrage hat ergeben, dass noch zwei Prozesse (Y und Z) als mögliche Parallelprozesse zum Leitprozess (X) zur Auswahl stehen.
- Nach den Erfahrungswerten wurden für Prozess X eine Dauer von 20 Minuten, für Prozess Y 30 Minuten und für Prozess Z 50 Minuten angegeben.
- Fall 1 stellt den Normalfall dar. Die Dauern werden als plausibel angesehen und übernommen. Dies führt dazu, dass Prozess Y nach diesem Kriterium weiterhin parallel möglich ist, Prozess Z jedoch nicht, da seine Dauer 20 Minuten über dem Maximum liegt.
- Im Fall 2 erkennt das verantwortliche Personal die Schwere der Störung und setzt für den Leitprozess zusätzliche 20 Minuten an. Somit sind weiterhin beide Prozesse parallel möglich.
- Im Fall 3 bestimmt das verantwortliche Personal, dass die Behebung der Störung nur 20 Minuten dauern wird und verringert die Dauer des Leitprozesses um 10 Minuten. Somit ist weder Prozess Y noch Z parallel möglich.
- Fall 4 wird zur Vollständigkeit erwähnt, da dieser nur mit großem Aufwand und der manuellen Änderung der im Prozessmodell hinterlegten Erfahrungsdaten möglich ist. Diese hinterlegten Prozessdauern werden aus Unterlagen früherer Projekte und durch Expertenmeinungen in der Arbeitsvorbereitung bestimmt und sollten nur in Sonderfällen angepasst werden. Für Prozess Y werden zusätzliche 10 Minuten angesetzt, Prozess Z jedoch um 20 Minuten verringert. Somit wäre nun nur noch Prozess Z parallel zu Prozess X möglich.

⁴²⁸ Siehe hierzu alternative Variante der Prozessdauer in Kapitel 8.5.1.

Ausgewählter Leitprozess – Fall 1			
Prozess X			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	0	0	
Prozess Y			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	0	0	
Prozess Z			
Prozessdauer [min]	+	-	
50	0	0	

Ausgewählter Leitprozess – Fall 2			
Prozess X			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	20	0	
Prozess Y			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	0	0	
Prozess Z			
Prozessdauer [min]	+	-	
50	0	0	

Ausgewählter Leitprozess – Fall 3			
Prozess X			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	0	10	
Prozess Y			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	0	0	
Prozess Z			
Prozessdauer [min]	+	-	
50	0	0	

Ausgewählter Leitprozess – Fall 4			
Prozess X			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	0	0	
Prozess Y			
Prozessdauer [min]	+	-	
30	10	0	
Prozess Z			
Prozessdauer [min]	+	-	
50	0	20	

Abb. 52: Beispielfälle zu den Möglichkeiten der individuellen Prozessdaueranpassung

7.7.2 Filter

Nachdem die Prozesse, deren Ausführung unter den gegebenen Umständen parallel zum aktuellen LP möglich ist, anhand der Kriterien ermittelt wurden, erfolgt anhand verschiedener Filter die Erstellung einer Rangfolge der möglichen Parallelprozesse (PP). Es wird erreicht, dass die vorgezogene Ausführung von Prozessen erfolgt, deren zeitnahe (negativer) Einfluss auf die DWEP am wahrscheinlichsten ist. Es erfolgt wiederum ein Abgleich mit dem aktuellen Baustellenzustand bzgl. des Baufortschritts und der Dauer der Arbeiten (produktive Arbeitszeit) sowie der dokumentierten Daten bzgl. der Abhängigkeiten der Prozesse, der Prozesshäufigkeit und des letztmaligen Auftretens der Prozesse (Ort oder Zeit). Alle möglichen Parallelprozesse durchlaufen einen Filter nach dem anderen. Befinden sich z.B. nach dem ersten Filter drei Prozesse auf einer Stufe, werden diese zusätzlich nach dem zweiten Filter geordnet, bis eine eindeutige Rangfolge ohne gleiche „Platzierung“ vorhanden ist. Es können beliebig viele Filter definiert werden, die jedoch mit eindeutigen Kennzahlen der Prozesse abgleichbar sein müssen. Im Folgenden wird der Ablauf mit vier Filtern erläutert, womit sich eine ausreichend genaue Rangfolge ermitteln lässt. Weitere oder weniger Filter sind denkbar. Der gewählte Filter 4 sorgt im Prozessmodell abschließend für eine eindeutige Sortierung, da jede Prozessnummer nur einmal vorkommt.⁴²⁹

Ablauf Filterabfrage

Das Filtern wird (siehe Abb. 53) automatisch nach der Kriterienabfrage durchgeführt, wobei die folgenden Schritte ablaufen:

1. Nachdem die Prozesse, die alle Kriterien erfüllen, ermittelt sind, werden diese anhand der definierten Filter priorisiert, bis eine eindeutige Rangfolge vorhanden ist.
2. Als erstes werden alle möglichen Prozesse nach Filter 1 geordnet.
3. Haben alle Prozesse einen unterschiedlichen Rang, kann die Prozessrangfolge angezeigt werden.
4. Haben zwei oder mehr Prozesse den gleichen Rang, werden diese nach Filter 2 geordnet.
5. Haben alle Prozesse einen unterschiedlichen Rang, kann die Prozessrangfolge angezeigt werden.
6. Haben zwei oder mehr Prozesse den gleichen Rang, werden diese nach Filter 3 geordnet.
7. Haben alle Prozesse einen unterschiedlichen Rang, kann die Prozessrangfolge angezeigt werden.
8. Haben zwei oder mehr Prozesse den gleichen Rang, werden diese nach den Prozessnummern (Filter 4) geordnet und die Prozessrangfolge wird angezeigt.

⁴²⁹ Erläuterung siehe S.152, „Prozessnummer“.

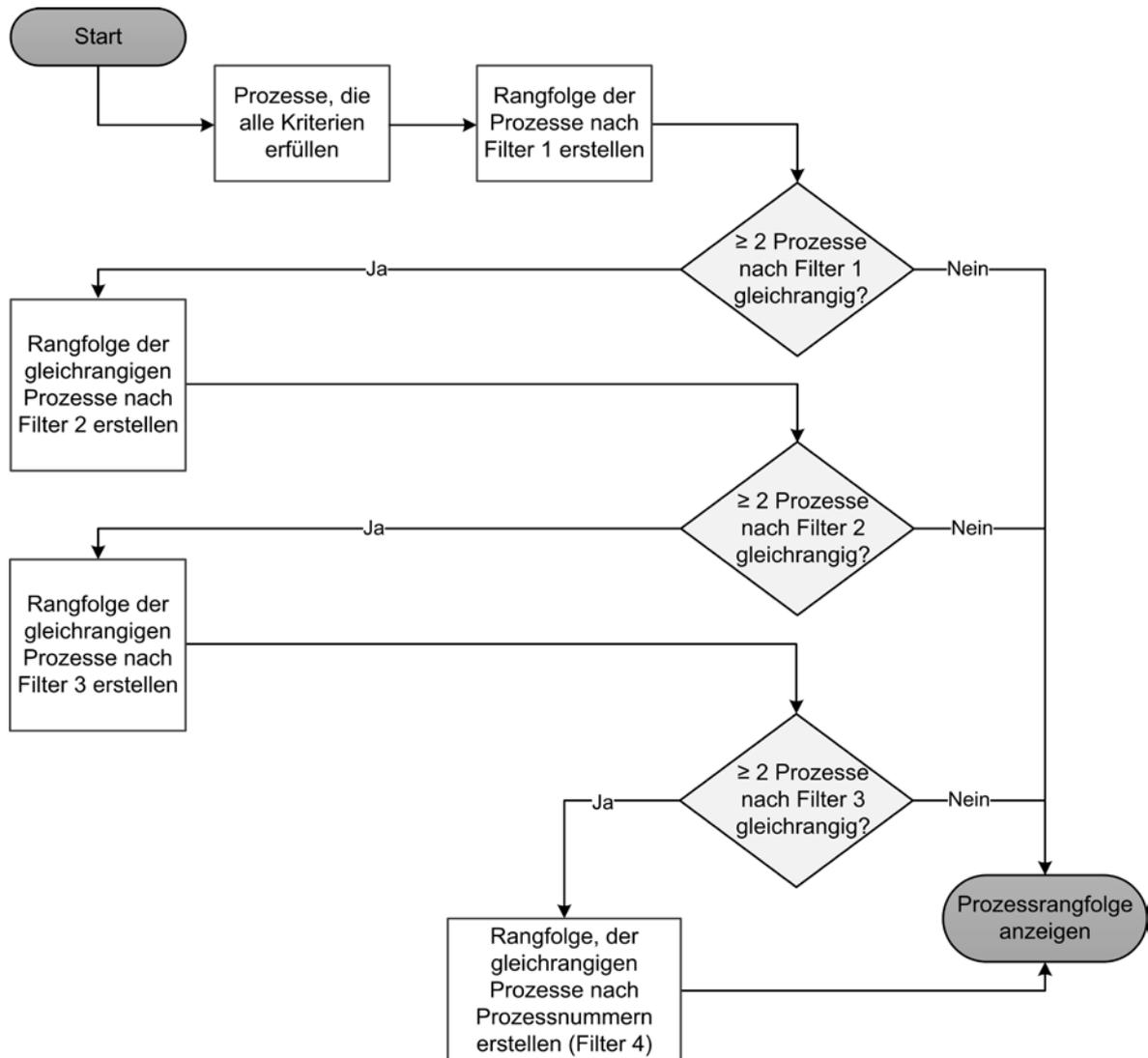


Abb. 53: Ablauf Anwendung der Filter zur Rangfolgenbildung

Die folgenden ersten vier Filter erscheinen für das Prozessmodell als sinnvoll, da sie dem ermittelten Zielsystem am meisten entsprechen und die Dringlichkeit / Einfluss der Prozesse herausstellen. Je nach Zielausrichtung sind weitere / andere Filter denkbar. Auch die Abfolge der Filter ist individuell anpassbar.

Mögliche Filter:

1. Fälligkeit
2. Häufigkeit
3. Dauer
4. Prozessnummer

5. Anzahl Nachfolger
6. Notwendige Ressourcen
7. Kostenverbrauch
8. Außenwirkung

Filter Fälligkeit

Die IWEP werden nach einer bestimmten Dauer oder (z.B. bei Linienbaustellen) nach einer bestimmten Baustellenlänge (Meter Straßen, Meter Brücke, Vortriebslänge) notwendig. Sie sind in relativ regelmäßiger Wiederholung auszuführen, sie haben also eine zeitliche oder örtliche zyklische Fälligkeit. Diese IWEP sind zwingend auszuführen, jedoch ist der Zeitpunkt ihrer Ausführung (individuell für jeden Prozess) flexibel. In der Netzplantechnik wird diese Flexibilität mit „Frühester (möglicher) Anfang“ (FA) und „Spätester (möglicher) Anfang“ (SA) beschrieben (siehe Kapitel 2.1.5). In Kapitel 8.5.2 wird ein Beispiel hierzu gegeben.

Werden die NWEPE (Behebung einer Störung) über einen längeren Zeitraum und in ausreichend großer Anzahl (Häufigkeit) dokumentiert, können sich auch für ihr Auftreten relativ regelmäßige Zeit- bzw. Ortsintervalle ergeben. Die Aussagekraft dieser erfassten Daten (z.B. Ausreißer, Sonderfälle) sind kritisch zu hinterfragen. Sind diese Kriterien jedoch erfüllt⁴³⁰, lässt sich das Auftreten von Störungen abschätzen, indem den NWEPE auch eine zyklische Fälligkeit zugeordnet wird. Um weitreichendere Auswirkungen zu vermeiden, werden dann diese NWEPE als Wartungen / Inspektionen / Kontrollen fällig, wodurch sie begrifflich zu IWEP werden, da die präventiven Ausführungen indirekt werterzeugend eingesetzt werden. Zum Beispiel kann die Information, dass in näherer Zukunft der Austausch eines Maschinenteils fällig wird, in die Planung miteingehen und schwerwiegendere Störungen durch unvorhergesehene Wartezeiten (bspw. aufgrund langer Lieferzeiten von Ersatzteilen) verhindert werden.

Für den Anwender des Prozessmodell stellt es einen besonderen Mehrwert dar, zu wissen, wann bspw. ein bestimmter IWEP fällig wird (= potentielle Minderung der Kapazität der DWEP). Bei der Auswahl des dringendsten Prozesses der möglichen Parallelprozesse spielt alleine seine absolute Fälligkeit beim Abgleich mit den Fälligkeiten der anderen Prozesse eine Rolle, nicht z.B. die Fälligkeit im Verhältnis zum Gesamtprojekt. Die Werte der „zyklischen Fälligkeit“ aller Prozesse werden in Bezug zu einer spezifischen Bezugsgröße des aktuellen Tunnelvortriebs gesetzt und diese auf eine einheitliche Normskala umgerechnet. Für jeden Prozess wird die aktuelle zyklische Fälligkeit bezogen auf den Ort oder die Zeit des Vortriebs ermittelt, die eindeutigen Werte der Prozesse lassen sich miteinander vergleichen.

$$SA_o = SF - AO + LD \quad [m]$$

Formel 7: Berechnung SA [m] in Abhängigkeit vom Vortriebsort

SA _o	=	Spätester Ausführungsbeginn [m]
SF	=	Tunnelmeter bis Wiederholung / Späteste Fälligkeit [m]
AO	=	Aktueller Ort [m]
LD	=	Ort der letzten Durchführung [m]
F	=	Fälligkeit [%]

⁴³⁰ Auch die Implementierung andere Verfahren zur Ermittlung von z.B. Wartungsintervallen ist für das Prozessmodell denkbar. Beispielsweise sei verwiesen auf Conrads et. al. (2017).

Die Fälligkeit lässt sich nach der folgenden Formel ermitteln und nach der in Abb. 54 dargestellten Normskala einordnen. Je geringer der Wert für F ausfällt, desto weniger „Reserve“ ist für diesen Prozess noch vorhanden und desto fälliger wird er.

$$F = SA_O * \frac{100}{SF} \quad [\%]$$

Formel 8: Berechnung der Fälligkeit [%] in Abhängigkeit vom Vortriebsort

- F = Fälligkeit [%]
- SA_O = Spätester Ausführungsbeginn [m]
- SF = Tunnelmeter bis Wiederholung / Späteste Fälligkeit [m]

F [%]	< 1 %	1 bis 10 %	11 bis 20 %	21 bis 30 %	31 bis 40 %	41 bis 50 %	51 bis 60 %	61 bis 70 %	71 bis 80 %	81 bis 90 %	91 bis 100 %
Fälligkeit (normiert)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Abb. 54: Normierung der Fälligkeit auf eine Normskala von 0 bis 10

Filter Häufigkeit

Durch das Dokumentieren des Auftretens der Prozesse ergeben sich Daten, die als Richtwert für zukünftige Projekte genutzt werden können. Innerhalb eines Projektes lässt sich anhand der Häufigkeiten erkennen, ob die wahre Ursache (bspw. mit der „5-Warum-Methode“, siehe 5.2.3) eines Problems noch nicht erkannt oder behoben wurde. Die Häufigkeit lässt einen Vergleich und die Erstellung einer detaillierteren Rangliste der Prozesse zu, die z.B. dieselbe Fälligkeit haben. Durch die Erbringung häufiger auftretender Prozesse (bspw. präventive Kontrolle ausfallanfälliger Maschinen) können schwerwiegendere Probleme verhindert werden bzw. der mögliche Prozessausfall (Maschinenausfall) in der Planung berücksichtigt werden (bspw. durch die frühzeitige Bestellung von Ersatzteilen).

Filter Prozessdauer

Die Priorisierung der möglichen Parallelprozesse nach der Prozessdauer kann auf verschiedene Arten erfolgen.

Beispielsweise können kürzere Prozesse priorisiert werden. Auf diese Weise wird das Risiko verringert, dass die Ausführung des Parallelprozesses länger dauert als die Ausführung des Leitprozesses. Dies würde im Gegensatz zur Forderung der Priorisierung des Leitprozesses stehen. Der Parallelprozess würde selbst zu einer (neuen) Störung werden, da er die Ausführung der DWEP weiter verzögert. Weiterhin bietet die Wahl dieser Anordnung die Möglichkeit, mehr als nur einen Parallelprozess in der Zeit des Leitprozesses durchzuführen (vorzuziehen), wenn die Summe der Prozessdauern aller Parallelprozesse kleiner gleich der Leitprozessdauer ist. Es können aber auch Prozesse mit längeren Prozessdauern priorisiert werden. Zu lange Prozesse (> Dauer Leitprozess) sind dann bereits mit dem Kriterium „Prozessdauer“ auszuschließen. Diese Anordnung ist sinnvoll, wenn die für den Leitprozess notwendige Zeit maximal ausgenutzt und so eine möglichst lange zukünftige Unterbrechung der DWEP durch das Vorziehen verhindert werden soll.

Filter Prozessnummer

Haben nach den ersten Filtern weiterhin mehrere Prozesse denselben Rang, werden diese nach ihrer Prozessnummer eindeutig sortiert. Bei der Bearbeitung des Prozessmodells in der Arbeitsvorbereitung ist darauf zu achten, dass bei der Prozessnummernvergabe bereits eine Priorisierung der Prozesse erfolgt (z.B. Nummern DWEP > Nummern IWEP > Nummern NWEPE), wodurch diese mit dem letzten Filter zur eindeutigen Ranglistenbildung verwendet werden kann.

Filter Anzahl Nachfolger

Mit dem Filter Anzahl Nachfolger werden die Prozesse gemäß der Anzahl ihrer direkten Nachfolger angeordnet. Diese sind unmittelbar nach dem Prozess auszuführen. Hierbei ist zu beachten, dass der jeweilige Prozess zusammen mit seinen Nachfolgern zu betrachten ist und alle Kriterien und Filter (Prozessdauer, notwendige Ressourcen, technische Möglichkeit der parallelen Anwendung) aller Prozesse zu berücksichtigen sind.

Filter Verfügbare Ressourcen

Die Anordnung der möglichen Parallelprozesse nach den verfügbaren Ressourcen kann je nach Intention auf verschiedene Arten erfolgen.

Die erste Möglichkeit ist die Prozesse zu priorisieren, welche die geringste Anzahl an Ressourcen verbrauchen, um ggf. weitere Parallelprozesse ausführen zu können.

Die zweite Möglichkeit ist die Prozesse mit dem größten Ressourcenbedarf zu priorisieren, um die aufgrund des Leitprozess entstandenen freien Ressourcen möglichst maximal auszunutzen.

Beispiel Anwendung von vier Filtern

Im dargestellten Beispiel (siehe Tabelle 4) sind nach der Kriterienabfrage die Prozesse Q bis Z als Parallelprozess möglich. Für diese sind die Prozessnummern, die Fälligkeiten, die Häufigkeiten und die erwartete Dauer angegeben.

Filter 1 ergibt, dass die Prozesse Q, R, U und X denselben Rang haben, da alle einen Fälligkeitwert von 10 besitzen. Filter 2 ergibt, dass nur noch die Prozesse R, U und X denselben Rang haben, da sie alle gleichhäufig (5 x) aufgetreten sind. Filter 3 ergibt, dass die Prozesse U und X sich den ersten Rang teilen, da die Ausführung beider 20 Minuten dauert. Da Prozess U eine geringere Prozessnummer hat (und damit wahrscheinlicher ein DWEP oder IWEP ist), ergibt sich eine eindeutige Rangfolge.

Prozess-name	Prozess-nummer	Fälligkeit	Häufigkeit	Dauer	Rang	Prozess-name	Fälligkeit Filter 1	Häufigkeit Filter 2	Dauer Filter 3	Prozessnr. Filter 4
Q	1	10	4	30	1	U	10	5	20	5
R	2	10	5	30	2	X	10	5	20	8
S	3	9	7	20	3	R	10	5	30	2
T	4	7	2	20	4	Q	10	4	30	1
U	5	10	5	20	5	S	9	7	20	3
V	6	9	7	30	6	V	9	7	30	6
W	7	9	3	30	7	W	9	3	30	7
X	8	10	5	20	8	Y	8	8	10	9
Y	9	8	8	10	9	Z	8	8	20	10
Z	10	8	8	20	10	T	7	2	20	4

Tabelle 4: Beispiel Rangfolgenbildung mit vier Filtern

7.8 Werkzeuge des Prozessmodells

Im Rahmen der Grundlagendarstellung von Lean Construction (vgl. Kap. 5) wurden die bekannten Lean-Prinzipien, die ersten daraus entwickelten Methoden für Lean Construction und der Ursprung von Lean - die Methoden des Toyota-Produktionssystems - erläutert. Die meisten dieser Methoden können nicht ohne Anpassungen auf das Bauwesen bzw. den Tunnelbau übertragen werden. Der mögliche Nutzen der einzelnen Maßnahmen für das Bauwesen im Allgemeinen wurde bereits in den „Wertboxen“ angedeutet. Bei der Entwicklung des Prozessmodells und der Anwendung der dabei berücksichtigten Methoden und Prinzipien wurde besonderer Wert daraufgelegt, dass sich die einzelnen Elemente optimal ergänzen und auf die Bedürfnisse des Prozessmodells anpassen. Die im Prozessmodell verwendeten Werkzeuge (TPS-Methoden, Lean-Ansätze, -Prinzipien) werden im Folgenden zusammengestellt, ihre Kernaussagen wiederholt und ihre Anwendungen bzw. ihr Wert im Prozessmodell dargestellt:

1. Kanban

Die Komplexität einer Produktion steigt mit zunehmender Anzahl der Prozesse an. Die Anzahl der notwendigen Prozesse (DWEP und IWEP) und der möglichen Störprozesse (NWEPE) ist ohne Hilfsmittel nicht überschaubar. Die Komplexität des Gesamtsystems darf jedoch keine Auswirkung auf die Einzelprozesse bzw. einzelne Prozessketten haben. Ein Kanban (siehe Kap. 5.2.3) ist ein Informationssystem, welches umgehend alle notwendigen Informationen zu einem Prozess liefern kann, um Verschwendungen durch Zeitverluste und Fehlerarbeiten zu verhindern. Ein Kanban (bspw. in der stationären Industrie) enthält die drei Basisinformationen: Entnahme-, Transport- und Produktionsinformationen.⁴³¹ Die Verwendung von Kanbans in dieser Form bei einem Rohrvortriebsprojekt erscheint sinnvoll. Beispielsweise durch die Ausstattung aller Rohrstücke mit Kanbans, um eine zweckmäßige Lagerung auf der Logistikfläche zu gewährleisten.

Das im Prozessmodell verwendete Kanban stellt das Prozessmodell selber dar. Durch die ständige Aktualisierung und das Einpflegen neu gewonnener Daten sind jegliche wichtige Informationen zu jedem einzelnen Prozess zu jeder Zeit verfügbar. Durch den automatischen Abgleich mit dem aktuellen Bauzustand und den daraus resultierenden Informationen zu den Prozessen (Fälligkeit, Häufigkeit, Dauer, Ressourcenverbrauch) werden eindeutige Vorgaben für die Prozessauswahl bereitgestellt, insbesondere in unübersichtlichen Situationen wie einem Störfall.

⁴³¹ Vgl. Ohno, 1993, S.54 ff.

2. Andon

Die Verwendung von Andons (dt. Laterne, Lampe) ist in der stationären Industrie nicht mehr wegzudenken und auch im Bauwesen finden sie sich beispielsweise in Form von Andonboards (= ausgedruckten Ampelsystemen auf Baustellenbesprechungsstafeln) wieder. Hierbei ist ein Andon ein einfaches visuelles Signal, welches auf ein Problem bzw. einen bestimmten Produktionsstatus aufmerksam macht und die vollständige Anzeige aller notwendigen Informationen zu jedem Zeitpunkt ermöglicht.⁴³² Auf diese Weise wird Transparenz geschaffen und auf denkbare Verschwendungen (z.B. Nicht-Nutzung freigewordener Ressourcen) aufmerksam gemacht.

Das Andon im Prozessmodell stellt die Fälligkeiten der Prozesse (insb. der IWEP und NWEF) dar. Durch die Normierung der Fälligkeiten auf eine Skala von 0-10 entsteht eine genaue und intuitiv zu deutende Ampel, mit Hilfe derer der Status der einzelnen Prozesse eingeschätzt und eingeplant werden kann.

3. Poka Yoke

Fehler und Defekte sind vor ihrem Auftreten durch möglichst einfache Prüfprozesse, welche präventiv erfolgen, zu verhindern. In der stationären Industrie wird hierfür Poka Yoke verwendet, worunter ein Gerät oder Verfahren zur Fehlererkennung, Fehlervermeidung und somit zur Verhinderung größerer Probleme verstanden wird. Das eingesetzte System bzw. Verfahren soll den Nutzer bei seiner Arbeit so unterstützen, dass dieser keine Möglichkeit hat, einen Fehler zu begehen. Es sollten so wenige Optionen wie möglich zur Auswahl stehen.⁴³³

Poka Yoke wird innerhalb des Prozessmodells auf dreierlei Art angewendet. Zum einen für die Nutzung des Prozessmodells selbst. Der Aufbau und die Kontrolle (z.B. in Form von Pop-up Kontrollfenstern) lässt nur ein Minimum an Möglichkeiten für die Anwendung zu, wodurch hierbei kaum / keine Fehler entstehen können.

Zum anderen hilft das Prozessmodell durch die Dokumentation der Prozesse (insb. Ort und Zeit der Prozessausführung, Häufigkeit von Störprozessen) die Notwendigkeit zur Ursachenforschung hervorzuheben, damit die tatsächlichen Ursachen für Stillstände ermittelt (bspw. mit Hilfe der 5-Warum-Methode) und zukünftig verhindert werden.

Die wichtigste Art von Poka Yoke im Prozessmodell ist die Verhinderung der Durchführung von - im ganzheitlichen Sinne, bezogen auf die Gesamtprozessproduktivität - nicht produktiven Prozessen durch das Aufzeigen von sinnvollen und somit produktiven Parallelprozessen.

⁴³² Vgl. Ohno, 1993, S.47, 148 und Dickmann, 2015, S.9.

⁴³³ Vgl. TBM Consulting Group, 2016 und vgl. Kaizen Institut, 2016, vgl. Ohno, 1993, S.151, vgl. Dickmann, 2015, S.9.

4. (Kunden-)Wert-Prinzip

Der Wert, welchen das jeweilige Produkt (bzw. die Dienstleistung) für den Kunden hat, ist der „entscheidende Ausgangspunkt von Lean Thinking“⁴³⁴. Der Wert ergibt sich bezogen auf den „Maßstab des Kunden“⁴³⁵, wobei der Kunde eine individuelle Persönlichkeit (oder Institutionen / Unternehmen) oder auch ein Prozesskunde sein kann.⁴³⁶ Der Hersteller (Anbieter der Leistung) ist für die Erzeugung des Wertes verantwortlich.⁴³⁷ Im Tunnelbau bzw. im Rohrvortrieb ist der vorgegebene Wert der fertige Tunnel. Dieser ist in der geforderten Qualität, zu den vereinbarten Kosten und in der vereinbarten Zeit zu erstellen.

Mit Hilfe des Prozessmodells sollen diese drei Ziele erreicht werden. Mit Hilfe der Zeit kann der größte positive Einfluss genommen werden. Wird die verfügbare Zeit sinnvoll genutzt - auch die Zeit während eines Stillstandes - so wirkt sich dies auch auf die Qualität und die Kosten aus. Mit dem Prozessmodell wird die Zeit zur sinnvollen Potentialverschiebung (Ablaufänderung, Vorziehen von Prozessen) verkürzt und somit ist für das verantwortliche Personal mehr Zeit für eine fundierte Entscheidungsfindung verfügbar. „Hektische Feuerwehraktionen“ sind somit nicht mehr notwendig, was wiederum zu weniger Fehlern und höherer Qualität führt. Wird durch eine produktive Arbeitsorganisation Zeit eingespart (bzw. nicht verloren), so fallen die Kosten (z.B. Betriebs-, Personal-, Mietkosten) für das Unternehmen. Die Optimierung der Produktivität ist das übergeordnete Ziel des Prozessmodells, welches dadurch sichergestellt wird, dass die DWEP gemäß ihrer Kapazität ausgeführt werden. Dies wird erreicht indem der jeweilige Leitprozess herausgestellt wird, während eines Stillstands weitere zukünftige, die Kapazität der DWEP verringernde Stillstände erkannt und in der Zeit des aktuellen Stillstandes, falls möglich, ausgeführt werden können. Zudem werden die Ursachen für Stillstände ermittelt, analysiert, dokumentiert und zukünftig berücksichtigt. Ausgangspunkt des Prozessmodells ist somit ebenfalls das Wert-Prinzip.

5. Fluss-Prinzip

Das Fluss-Prinzip beschreibt, wie innerhalb des Produktionsprozesses den einzelnen Prozessen jeweils eine bestimmte Arbeitsmenge zugeordnet wird, welche innerhalb einer bestimmten, vorgegebenen Zeit (der sog. Taktzeit) erbracht werden kann.⁴³⁸ Auf diese Weise soll ein kontinuierlicher Arbeitsfluss entstehen. Im Bestreben die Gesamtproduktivität zu optimieren, wurde die Konzentration lange auf die Optimierung der einzelnen Prozesse gelegt, ohne dabei das übergeordnete System zu berücksichtigen.⁴³⁹ Ein Fluss der Arbeiten kann jedoch nur entstehen, wenn das Gesamtsystem betrachtet wird und der jeweilige Prozess ermittelt wird, welcher zu einem bestimmten Zeitpunkt die Gesamtkapazität bestimmt. Dieser wird im Prozessmodell als Leitprozess bezeichnet und seine Priorisierung und Optimierung sind, gemeinsam mit der Flexibilität durch die Möglichkeit von Parallelprozessen, für die Geschwindigkeit des Gesamtprozesses und somit für den Fluss der Produktion verantwortlich.

⁴³⁴ Womack & Jones, 2013, S.24.

⁴³⁵ Erlach, 2010, S.9.

⁴³⁶ Vgl. Heidemann, 2010, S.5.

⁴³⁷ Vgl. Erlach, 2010, S.9.

⁴³⁸ Vgl. Bregenhorn, 2015, S.16.

⁴³⁹ Vgl. ebenda, S.28.

6. Pull-Prinzip

Mit dem Pull- oder Zug-Prinzip wird gefordert, dass ein bestimmter Prozess erst erbracht wird, sobald ein nachgelagerter Kunde diesen abrufen. Somit soll ein Fertigungsfluss entstehen, da jeder Prozess den nächsten Prozess nach sich zieht.

Mit dem Prozessmodell wird dieser Forderung auf zweierlei Art Rechnung getragen. Zum einen sind bei der Bestimmung der Grundinformationen, wie der möglichen Parallelprozesse, der Prozessdauer oder der notwendigen Ressourcen sowie bei der Auswahl eines möglichen Parallelprozesses, die Planer vor Ort bzw. das ausführende Personal mit eingebunden, so wie es beispielsweise im Last Planner® System (LPS) gefordert wird.

Zum anderen sind für die Ausführung der Prozesse (insb. der DWEP) bestimmte Voraussetzungen (z.B. IWEP) zu erbringen. Diese Forderung wird mit den jeweiligen Fälligkeiten der Prozesse erfüllt.

7. Standardprozesse (Standard Processes)

Standards (bzw. Standardprozesse oder -vorgehen) sind notwendig, um Abweichungen vom Normalzustand feststellen zu können. In der Fließfertigung müssen die Arbeiter aufgabenübergreifende Fähigkeiten besitzen und die Maschinen zu jedem Zeitpunkt bedienen können. Deshalb müssen die Arbeiten „radikal standardisiert werden“.⁴⁴⁰

Die gleiche Forderung wird mit dem Prozessmodell verfolgt. Erfahrene Bauleiter können sinnvolle Ausweich- oder Parallelprozesse im Falle einer Störung bzw. eines Stillstandes aufgrund ihrer Routine auswählen. Ob die jeweilige subjektive Entscheidung jedoch tatsächlich die sinnvollste (in Bezug auf das Projektziel) ist, kann angezweifelt werden, insbesondere in Krisensituationen. In einem Gewerbe, welches auf sehr präziser Planung, (Ver-)Messung und Kontrolle basiert, wie es der Tunnelbau ist, ist die Möglichkeit zur (relativ) subjektiven Entscheidung von Ablaufanpassungen und Prozessanordnungen (insbesondere in außerplanmäßigen Situationen) fragwürdig.

Mit dem Prozessmodell wird ein Standardverfahren bereitgestellt, welches unabhängig von der Erfahrung des Personals angewendet werden kann. Es werden standardisierte, mögliche und sinnvolle Prozesse aufgrund fundierter Daten ausgewählt und als Hilfestellung bereitgestellt. Die Kapazität der entscheidenden Person wird damit nicht durch die Suche eines Ausweichprozesses belastet, sondern beschränkt sich auf sein menschliches Ermessen und das Einschätzen der jeweiligen Situation (z.B. Schwere der Störung und damit der voraussichtlichen Dauer) sowie die Auswahl der vom Prozessmodell vorgeschlagenen Prozesse.

⁴⁴⁰ Womack & Jones, 2013, S.77.

8. Engpasstheorie

Die Grundidee des Prozessmodells kann auf die Engpasstheorie (engl.: Theory of Constraints, TOC) von *Goldratt* zurückgeführt werden. Mit dieser wird beschrieben, dass in einem System mit einer bestimmten Anzahl an Ereignissen ($n > 2$) (aufeinanderfolgend und parallelverlaufend) der Durchsatz des Systems von mindestens einem der Ereignisse bestimmt wird.⁴⁴¹ Dieser Prozess wird als Engpass definiert, da er denjenigen Prozess (auch Fertigungseinheit oder Teilprozess) darstellt, dessen Kapazität gleich oder geringer als der darauf entfallende Bedarf ist.⁴⁴²

Im Prozessmodell wurde zur optimalen Unterstützung der DWEP dieser Engpass als Leitprozess definiert. Dieser ist, wenn die Ausführung des DWEP möglich ist, der DWEP selbst. Ist die Ausführung eines DWEP jedoch nicht möglich, so ist der Prozess, der die Ausführung eines DWEP verhindert, der Leitprozess. Dieser kann entweder ein IWEP oder ein NWEPP sein. Entsprechend der Engpasstheorie hat die Ausführung des Leitprozesses (Engpasses) die höchste Priorität.

9. Null-Fehler-Prinzip / Kaizen / Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (KVP)

Das Kaizen-Prinzip, welches den Ursprung des Null-Fehler-Prinzips und des Kontinuierlichen Verbesserungsprozesses (KVP) darstellt, lässt sich als ständige Verbesserung unter Einbeziehung jeglicher Mitarbeiter beschreiben.⁴⁴³ Der Begriff steht für die Einstellung, „ständiges Verbessern um der Verbesserung willen zu betreiben“.⁴⁴⁴ Der Wertstrom durch den gesamten Herstellungsprozess wird immer besser erkannt, die Produktion in einen immer gleichmäßigeren Fluss gebracht, die einzelnen Aufgaben immer konsequenter abgerufen und somit ein immer wirtschaftlicherer Herstellungsprozess erreicht. Mit diesem Vorgehen soll der Perfektion immer nähergekommen werden.

Im Prozessmodell erfolgt dieses Streben nach der ständigen Verbesserung durch die kontinuierliche und ausführliche Dokumentation der einzelnen Prozesse. Die zyklischen Fälligkeiten, die notwendigen Ressourcen, die Prozessdauern und die Häufigkeiten der Prozesse werden zunehmend detaillierter erfasst und helfen, die Störungsbehebung, die Störungs- und Stillstandvermeidung und die Planung permanent zu verbessern. Zudem werden die Mitarbeiter (z.B. Bauleitung vor Ort) mit in den Verbesserungsprozess (Anpassung der Prozessinformation) miteinbezogen.

⁴⁴¹ Eigene Schlussfolgerung in Anlehnung an Goldratt, 2004.

⁴⁴² Vgl. ebenda, S.157.

⁴⁴³ Vgl. Imai, 1993, S.15.

⁴⁴⁴ Haß, 1995, S.24.

10. Verschwendungsvermeidung - Nicht-Nutzung freigewordener Potentiale

Das Ziel des Toyota Produktionssystems (TPS) und aller Lean-Prinzipien, die Produktivität zu optimieren, kann nur durch die Vermeidung von Verschwendungen erreicht werden. Nach *Ohno* stellen nur notwendige Arbeiten tatsächlich Arbeit dar. Der Rest wird als Verschwendung bezeichnet. *Womack* und *Jones* bestimmen alle menschlichen Aktivitäten, welche Ressourcen verbrauchen, aber keinen Wert erzeugen als Verschwendung.⁴⁴⁵ Durch die oben genannten Werkzeuge des Prozessmodells wird versucht die in der Literatur genannten sieben klassischen Verschwendungsarten (siehe Kap. 5.2.2) zu reduzieren bzw. gänzlich zu vermeiden.

Als eine weitere Verschwendungsart wurde die Nicht-Nutzung von in außerplanmäßigen Situationen entstandener Potentiale identifiziert. Diese Potentiale können bei Stillständen aufgrund von Störprozessen in Form von freigewordenen Ressourcen (Personal, Maschinen, Zeit) entstehen. Werden diese Potentiale nicht sinnvoll (bspw. durch Einsatz in Parallelprozessen) genutzt, entsteht wiederum Verschwendung.

⁴⁴⁵ Vgl. *Womack & Jones*, 2013, S.23.

8 Validierung Prozessmodell und Methodik im Rohrvortrieb

In den vorangegangenen Ausführungen wurden die Grundlagen für ein Prozessmodell zur Vermeidung von Verschwendungen - insbesondere im Falle außerplanmäßiger Situationen - sowie die zugehörigen Methoden zur Bestimmung und Optimierung der Prozessanordnung mit Hilfe verschiedener Lean-Methoden vorgestellt. Im Kapitel 7 wurde das Prozessmodell allgemeingültig aufgestellt und seine Ziele, Funktionen, sein Ablauf und die eingesetzten Werkzeuge erläutert.

In diesem Kapitel wird die Funktionalität und Anwendbarkeit dieser neuen Ansätze an einem Beispiel des Rohrvortriebs validiert.

Für die im Bauablauf auftretenden Prozesse, die möglichen Störprozesse und die notwendigen Eingangsgrößen wie Prozessdauern, Prozessabhängigkeiten und Ressourcenverfügbarkeit werden vorliegende Erfahrungsdaten, Literaturwerte und Aussagen direkt beteiligter Anwender (insb. Bauleitung von *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG*⁴⁴⁶) verwendet. Bei fehlenden Ansätzen werden Abschätzungen vorgenommen. Aufgrund der erstmaligen Anwendung des Modells können einige Aussagen der direkt Beteiligten ebenfalls nur als erste Abschätzungen angesehen werden, welche sich mit der Anzahl der Anwendungswiederholungen zunehmend verfeinern werden. Diese Ungenauigkeiten können für die Validierung vernachlässigt werden, da das Ziel der Nachweis der generellen Anwendbarkeit der entwickelten Methodik und dem ihr zugrundeliegenden Prozessmodell sowie der Funktionalität des Prozessmodells ist. Für die Bewertung der Ergebnisse gilt es zu beachten, dass durch die wiederholte Anwendung der Methode und die Verwendung der hierbei erhaltenen Realdaten genauere Ergebnisse zu erwarten sind.

Im ersten Abschnitt 8.1 wird das Projekt, bei welchem das Prozessmodell erstmals angewendet wurde, dargestellt. Im Abs. 8.2 wird die Auswahl, Ermittlung und Aufbereitung der realen Projektdaten erläutert. Die im Kapitel 3 definierten Prozesskategorien werden mit Beispielen aus dem Rohrvortrieb im Abs. 8.3 verdeutlicht. Zudem werden der Ablauf der Ermittlung von zukünftigen IWEP und NWEF beim Rohrvortrieb sowie die Dokumentation aller auftretenden Prozesse und die Ziele sowie der Ablauf des Prozessmodells speziell beim Rohrvortrieb im Abs. 8.4 erläutert. Die Durchführung des Prozessmodells mit den tatsächlich angewendeten Kriterien und Filtern wird im Abs. 8.5 detailliert beschrieben. Der Aufbau des Prozessmodells und Beispiele für seine praktische Anwendung werden in den Abs. 8.6 und 8.7 dargestellt.

⁴⁴⁶ Seit 1999 bestehen unter dem Namen Wayss & Freytag zwei Gesellschaften, die BAM Deutschland AG und die Wayss & Freytag Ingenieurbau AG. Diese sind aus dem deutschen Bauunternehmen Wayss & Freytag AG hervorgegangen. Sie sind seit 2002 Tochtergesellschaften der Royal BAM Group, welche das größte niederländische Bauunternehmen ist.

8.1 Projektbeschreibung

Die Validierung von Prozessmodell und Methodik erfolgte an einem Tunnelbauprojekt im Rohrvortriebsverfahren. Dieses wurde von der Fa. *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG* (W&F)⁴⁴⁶ ausgeführt.

Es handelt sich bei dem Bauvorhaben um ein Teillos des Innenstadt-Entlastungsprogramms der Hamburger Stadtentwässerung (HSE) zur Sanierung des Abwassertransportsielnetzes in der Hamburger Altstadt. Die gemauerten Stammsiele sind rund 100 Jahre alt und übernehmen noch heute einen bedeutenden Teil des Hamburger Abwassertransportes. Allerdings sind Teile dieses alten Abwassernetzes sanierungsbedürftig und als klassisches Mischwassersystem nicht mehr in der Lage, bei Starkregenereignissen alle Abwasser schadlos aufzunehmen. Aus diesem Grund wurde das Entlastungsprogramm entwickelt. Bei diesem werden parallel zu den alten Kanälen tiefliegende Transportsiele gebaut, die anschließend über Schächte ca. alle 600 bis 800 m an das bestehende Netz angeschlossen werden. Nach Fertigstellung dieser können auf sie die Abwässer umgeleitet werden und anschließend die Alt-Siele haltungsweise saniert werden. Im Anschluss sind beide Systeme parallel nutzbar und stellen die notwendige Abflusskapazität bereit. Das gesamte Bauvorhaben umfasst die Herstellung eines Transportsieles zwischen dem Pumpwerk Hafenstraße und dem Anschluss an das Isebekstammsiel am Isebekkanal („Transportsiel Isebek“) sowie eines Transportsiels zwischen dem Stephansplatz mit einem Anschluss an das Geeststammsiel und dem Alten Elbpark („Transportsiel Wallring“). Das Bauvorhaben ist in mehrere Bauabschnitte und Baulose aufgeteilt, welche getrennt ausgeschrieben und vergeben werden.

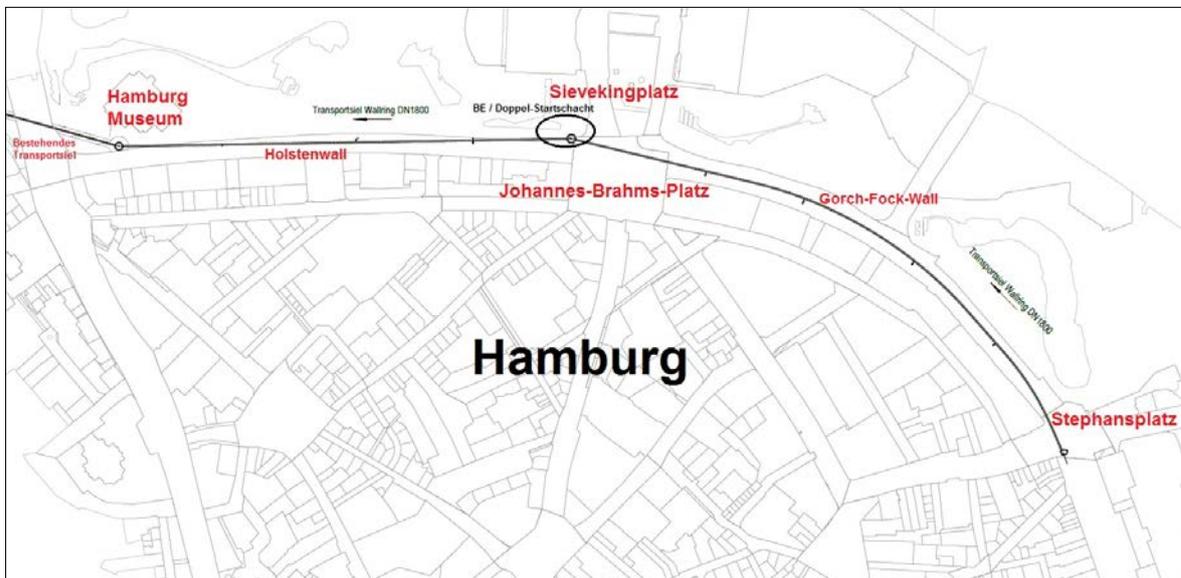


Abb. 55: Projektlageplan

Seine Anwendung fand das Prozessmodell im Los „Transportsiel Wallring“ (Lageplan in Abb. 55). Dieses beinhaltet den betriebsfertigen Neubau einer Abwasserleitung (Transportkanal) mit einem Durchmesser DN 1800 (aus Stahlbetonrohren mit innerem Korrosionsschutz aus PEHD), welcher im Hydroschildverfahren aufgeföhren wurde. Die Leitung verläuft auf einer Länge von ca. 1.410 m zwischen dem Stephansplatz und dem Millerntor in den Straßen Gorch-Fock-Wall und Holstenwall im Bezirk Hamburg-Mitte. Das Transportsiel

Wallring beginnt an der U-Bahnstation Stephansplatz mit einer Baugrube für ein Anschlussbauwerk an das vorhandene Geeststammziel. Es verläuft durch den Gorch-Fock-Wall bis zum Sievekingplatz / Johannes Brahms-Platz. Die Trasse verläuft weiter durch den Holstenwall bis an eine vorhandene Vortriebsbaugrube am „Hamburgmuseum“. Hier wird das Transportsiel Wallring an den bereits fertiggestellten Bauabschnitt „Transportsiel Isebek, 1. Bauabschnitt, Los 1“ angeschlossen. Durch die vorhandenen Anschlusshöhen und durch die wechselnde Topographie liegt das neue Transportsiel bis zu 25 m unter Gelände. Die Trasse hat ein durchgehendes mittleres Gefälle von ca. 2,20 ‰. Die Strecke des Transportsiels von rund 1.410 m teilt sich auf in die Haltung von Stephansplatz bis Johannes-Brahms-Platz mit ca. 810 m und die Haltung vom Johannes-Brahms-Platz bis zum Hamburgmuseum mit ca. 600 m. Der 27 m tiefe Doppel-Startschacht wurde am Sievekingplatz / Johannes-Brahms-Platz erstellt.

Parameter	Projekt: Transportsiel Wallring	
Bauzeit	April 2016 bis Juni 2018	
Bauzeit Vortrieb 1 (Johannes-Brahms-Platz bis Hamburgmuseum)	Oktober 2016 bis Januar 2017	
Bauzeit Vortrieb 2 (Stephansplatz bis Johannes-Brahms-Platz)	Februar 2017 bis Juni 2018	
Anzahl Kontrollschächte als Einstiegsschächte Verfahren	7 Offenes Absenkverfahren als Brunnengründung	
Tunnellänge	Vortrieb 1	Vortrieb 2
	600 m	810 m
Mittleres Gefälle	2 ‰	
Tiefe Startschacht	27 m	
Durchmesser Startschacht	DN 1800 – DN 2200	
Durchmesser Stahlbetonrohre	10,3 m	
Vortriebsverfahren	Hydroschild	

Tabelle 5: Parameter Projekt Transportsiel Wallring

Die beim „Transportsiel Wallring“ genutzte Version des Prozessmodells wurde speziell auf dieses Projekt angepasst. Diese Anpassungen betreffen insbesondere das zweite (Ressourcen) und dritte Kriterium (Prozessdauer). Mit diesen Kriterien wurden keine Prozesse direkt ausgeschlossen, sondern bei Nicht-Erfüllung die betroffenen Werte farblich markiert. Dies wurde als sinnvoll erachtet, da zum einen die hinterlegten Daten aus vergleichbaren Projekten, aufgrund der geringen Datenmenge, noch nicht als aussagekräftige Erfahrungswerte bezeichnet werden konnten. Für diese wurden folglich Schätzwerte⁴⁴⁷ verwendet. Zum anderen handelte es sich bei der Anwendung um die erste Validierung des Prozessmodells und der generellen Anwendbarkeit dieses.

⁴⁴⁷ Bestimmt durch direkt beteiligte Bauleiter W&F.

8.2 Rohrvortriebsdaten für das Prozessmodell

Mit dem Prozessmodell wird ein reales System, ein reales Rohrvortriebsprojekt dargestellt. Es liefert dem Modellanwender insbesondere beim Auftreten einer außerplanmäßigen Situation (bspw. einer Betriebsstörung der Tunnelbohrmaschine) eine fundierte Entscheidungsunterstützung, damit dieser möglichst unverzüglich optimale Maßnahmen für die Behebung des realen Problems und eine möglichst optimale Nutzung der Stillstandzeit einleiten kann. Das entwickelte Prozessmodell ist mit - für den Rohrvortrieb - relevanten Informationen zu füllen, damit das Zielsystem des Prozessmodells bestmöglich erreicht werden kann. Die bereits im Vorherein vorhandenen Daten und geplanten Prozesse sind so zu erfassen und aufzubereiten, dass sie zur Optimierung des Bauablaufs im Rohrvortrieb im Falle eines ungeplanten Prozesses (= Behebung einer Störung) beitragen. Im Folgenden wird dargelegt, welche Daten für den Rohrvortrieb von besonderer Bedeutung sind, wie diese ermittelt und für das Prozessmodell nutzbar gemacht wurden.

Die Ausgangsbasis für die Erhebung der Daten für das Prozessmodell stellen primäre Daten aus internen Quellen dar. Es wurden die von *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG (W&F)* bereits verwendeten **Stillstandcodes** (= Prozessnummern) und deren Systematik für die Anlage bereits bekannter sowie neuer Prozesse übernommen. Außerdem wurden verschiedene Unterlagen zur Auswertung von Vortriebsleistungen und Stillständen verwendet. Zu diesen zählen:

- Bautagesberichte
- Besprechungsprotokolle
- Maschinenauswertungen
- Vortriebsauswertungen.

Zahlreiche **Gespräche** wurden mit der Geschäftsführung, internen Projektleitern, dem internen Leiter für Lean und Lean Construction sowie mit der Bauleitung vor Ort geführt. Insbesondere durch den Austausch mit dem direkt beteiligten Personal und den praktischen Anwendern des Prozessmodells ist die Informationstiefe bzgl. verschiedener Fokusbereiche wie beispielsweise der Ermittlung der Abhängigkeiten der einzelnen Prozesse untereinander oder des Ressourceneinsatzes, deutlich erhöht worden.

Die Wahl dieser Datenherkunft hatte weitere Gründe. Zum einen waren die Daten aus vorherigen Projekten für das Prozessmodell als relevant anzusehen, da sich Tunnelbau- bzw. Rohrvortriebsprojekte bezogen auf die Produktionsfaktoren (z.B. Ressourcen, Maschinen, Tunnelausstattung), den Ablauf, die Vortriebs- und Störprozesse sehr stark ähneln. So handelte es sich bei den im Prozessmodell hinterlegten Vortriebs-, Unterstützungs- und Störprozesse um tatsächliche, bereits im Unternehmen, bei vergleichbaren Projekten aufgetretene Prozesse.

Zum anderen dient das Prozessmodell in seiner ersten Variante⁴⁴⁸ als Hilfestellung für das Personal innerhalb des Unternehmens (W&F), wobei sich die Verwendung von bekannten

⁴⁴⁸ Erste Variante: Bezogen auf die Dissertation und die Wayss & Freytag GmbH. Spätere Varianten können an die Spezifikationen anderer Unternehmen und Vortriebsverfahren angepasst werden.

Bezeichnungen, Nummerierungen und Farbgebung für die intuitive Handhabung und Verständlichkeit als sehr nützlich erwiesen und die Akzeptanz erhöht hat.

Bei der Datenerfassung wurden die wesentlichen Leistungen und Prozesse sowie die mit diesen Prozessen verknüpften Randbedingungen und Einflussfaktoren ausgewählt. Zur vollumfänglichen Erfassung des jeweiligen Prozesses zählen seine Art, seine durchschnittliche⁴⁴⁹ bzw. abgeschätzte Dauer, für seine Erbringung bzw. Behebung notwendigen Ressourcen sowie seine Abhängigkeit zu anderen Prozessen.

Für jeden Prozess (Prozessnummer) wurden die folgenden **Prozessdaten** ermittelt:

- Technische Möglichkeit zur Ausführung parallel zu anderen Prozessen
- Notwendige Ressourcen (beschränkt auf Personal)
- Durchschnittliche / abgeschätzte Prozessdauer
- Anzahl der direkten Nachfolgeprozesse (= Abhängigkeiten)

Datenaufbereitung und Kennzahlenbildung im Prozessmodell

Damit die ermittelten Daten nutzbar sind und das Prozessmodell als eine tatsächliche Hilfestellung verwendet werden kann, müssen diese vergleichbar und somit stringent hinterlegt sein.

Kennzahlen sind im Allgemeinen dadurch gekennzeichnet, dass sie schnell und aussagekräftig über die untersuchten Sachverhalte informieren. Hierbei wurde bei der Anlage und Verwendung der oben genannten Daten beachtet, dass nicht alle Kennzahlen gleich bedeutsam sind und eine bestimmte Leistung messen. Vielmehr setzen sie die Prozesse in Verbindung zueinander (= vergleichend) und sind isoliert betrachtet wenig aussagekräftig.⁴⁵⁰ Zum Beispiel bieten sich der Vergleich der Fälligkeit oder der Dauer der Prozesse als bedeutende Kennzahl an. Hierfür wurden die Daten so strukturiert, dass sie stets untereinander gegenübergestellt werden können und zu jedem Zeitpunkt mit dem aktuellen Stand der Baustelle hinsichtlich des Tunnelfortschritts (aktueller Ort des Vortriebs, Vortriebslänge), der Fortschrittswdauer (Zeit, produktive Arbeits- / Vortriebsdauer⁴⁵¹) und der eingesetzten Ressourcen abgeglichen werden können.

Im Prozessmodell wurden wie die im Kapitel 7.1.2 erläuterten absoluten und relativen Kennzahlen angewendet.

⁴⁴⁹ Wird aus Erfahrungswerten gebildet und mit der Nutzung des Prozessmodells aktualisiert und verfeinert.

⁴⁵⁰ Vgl. Werner, 2010, S.293.

⁴⁵¹ Die genaue Ermittlung der produktiven Vortriebsdauer wird in Abs. 8.6.2 erläutert.

Absolute und relative Kennzahlen im Prozessmodell

Im Prozessmodell werden neben den Prozessnummern als absolute Kennzahlen (Einzelzahlen, Summen und Differenzen, verarbeitete Zahlen wie z.B. Mittelwerte) die folgenden Daten verwendet:

- Die Anzahl der Ressourcen (für den jeweiligen Prozess, insgesamt verfügbar und aktuell in Verwendung),
- die durchschnittliche Prozessdauer,
- die Häufigkeit
- und die Fälligkeit.

Allein die tatsächliche Größe der Kennzahlen im Vergleich zu den Werten der anderen Prozesse spielt eine Rolle. Das Rohrvortriebsprojekt ist durch viele unterschiedliche, für das Projekt einzigartige Parameter (z.B. Querschnitt und Länge des Tunnels, Geologie) gekennzeichnet. Der Bezug der Kennzahlen auf das gesamte Bauwerk als Vergleichskriterium ist deshalb weniger sinnvoll.

Die Ermittlung der Kennzahl der Fälligkeit stellt einen Sonderfall dar. Für den Anwender stellt es einen besonderen Mehrwert des Prozessmodells dar, zu wissen, wann bspw. ein bestimmter IWEP fällig wird. Bei der Auswahl des dringendsten Prozesses (= mit dem größten zukünftigen Einfluss) der möglichen Parallelprozesse spielt alleine seine absolute Fälligkeit eine Rolle beim Abgleich mit den Fälligkeiten der anderen Prozesse. Dieser Wert wird als eine relative Kennzahl ermittelt, also in einem Verhältnis zu einer spezifischen Bezugszahl. Die Werte der „zyklische Fälligkeit“ aller Prozesse werden in Relation zur spezifischen Bezugsgröße des aktuellen Tunnelvortriebs gesetzt und diese wird dann auf eine einheitliche Normskala umgerechnet (siehe Tabelle 6). Auf diese Weise lassen sich die Fälligkeiten als absolute Größen miteinander vergleichen. Für jeden Prozess wird somit fortwährend die aktuelle zyklische Fälligkeit bezogen auf den Ort oder die Zeit des Vortriebs ermittelt (relative Kennzahl) und daraus eine absolute Kennzahl zum Abgleich der Prozesse geschaffen.

		Fälligkeit (normiert)	F [%]
1	Spätester Ausführungsbeginn (SA) abhängig vom Vortriebsort	10	< 1 %
	$SA = SF - AO + LD \ [m]$	9	1 - 10 %
		8	11 - 20 %
2	Spätester Ausführungsbeginn (SA) abhängig von der Vortriebsdauer	7	21 - 30 %
	$SA = SF - VD_{pt} + LD \ [min]$	6	31 - 40 %
		5	41 - 50 %
		4	51 - 60 %
		3	61 - 70 %
3	Fälligkeit	2	71 - 80 %
	$F = SA * 100 / SF \ [%]$	1	81 - 90 %
		0	91 - 100 %

Tabelle 6: Ermittlung und Normierung der Fälligkeit nach Ort (Tunnelmetern)⁴⁵²

⁴⁵² Die erste und dritte Formel werden im Kapitel 7.7.2, die zweite Formel wird im Kapitel 8.5.2 ausführlich erläutert.

8.3 Prozesskategorien Rohrvortrieb

Die Anwendung der im Kapitel 3 entwickelten Prozesskategorien auf die Prozesse des Rohrvortriebs wird im Folgenden dargestellt. Das Prozessmodell wurde auf den Rohrvortrieb hin konzipiert, weshalb im Folgenden ausschließlich das Rohrvortriebsverfahren betrachtet wird.

Prozesskategorien

Die im Rohrvortrieb auftretenden Prozesse lassen sich den drei Prozesskategorien zuteilen. In Tabelle 7 ist dargestellt, dass die einzelnen Prozesse aus Zwecken der Übersichtlichkeit in übergeordnete Prozessgruppen eingeteilt werden. Die DWEP werden aufgeteilt in die Prozesse des Vortriebs und des Rohreinbaus. Die IWEP bilden als „Unterstützungsprozesse“ eine eigene Prozessgruppe. Die NWEP lassen sich in sechs übergeordnete Gruppen einteilen. Diese sind die Wartezeiten, die Behebung von Betriebsstörungen der Tunnelbohrmaschine bzw. des Schneidrads, des Tunnels bzw. Schachtes, der Baustelleneinrichtung und Logistik, der Separieranlage sowie die Behebung sonstiger Störungen.

Direkt Werterzeugende Prozesse - DWEP - Schlüsselprozesse (SP)
Vortrieb
Rohreinbau
Indirekt Werterzeugende Prozesse - IWEP - Unterstützungsprozesse (UP)
Nicht-Werterzeugende Prozesse - NWEP - Störprozess (StP)
Wartezeiten
Betriebsstörung TBM
Betriebsstörung Tunnel / Schacht
Betriebsstörung BE / Logistik
Betriebsstörung Separieranlage
Sonstige Störungen

Tabelle 7: Übergeordnete Prozessgruppen Rohrvortrieb

Leitprozess

Auch beim Rohrvortrieb können zu jedem Zeitpunkt des Gesamtprozesses Prozesse der drei Prozesskategorien auftreten. Um den Bauablauf jederzeit zu optimieren und im Fall einer Störung die negativen Folgen so gering wie möglich halten zu können, ist auch beim Rohrvortrieb die Ermittlung des jeweiligen Leitprozesses von großer Bedeutung. Nachfolgend wird die Definition des Leitprozesses mit Bezug zum Rohrvortrieb noch einmal wiederholt und seine Identifizierung findet nach dem in Abb. 56 dargestellten Ablaufschema statt.

Definition Leitprozess (LP) im Rohrvortrieb:

Ist die Ausführung entweder des **Vortriebs** oder des **Rohreinbaus möglich**, so ist einer dieser Prozesse der Leitprozess. Ist **weder** die Ausführung des Vortriebs **noch** des Rohreinbaus möglich, ist der Prozess, welcher die Ausführung der DWEP verhindert, der Leitprozess. Dieser kann entweder ein notwendiger IWEP oder ein NWEP (= Behebung einer Störung) sein.

Die Ausführung des **Leitprozesses** hat die **höchste Priorität**.

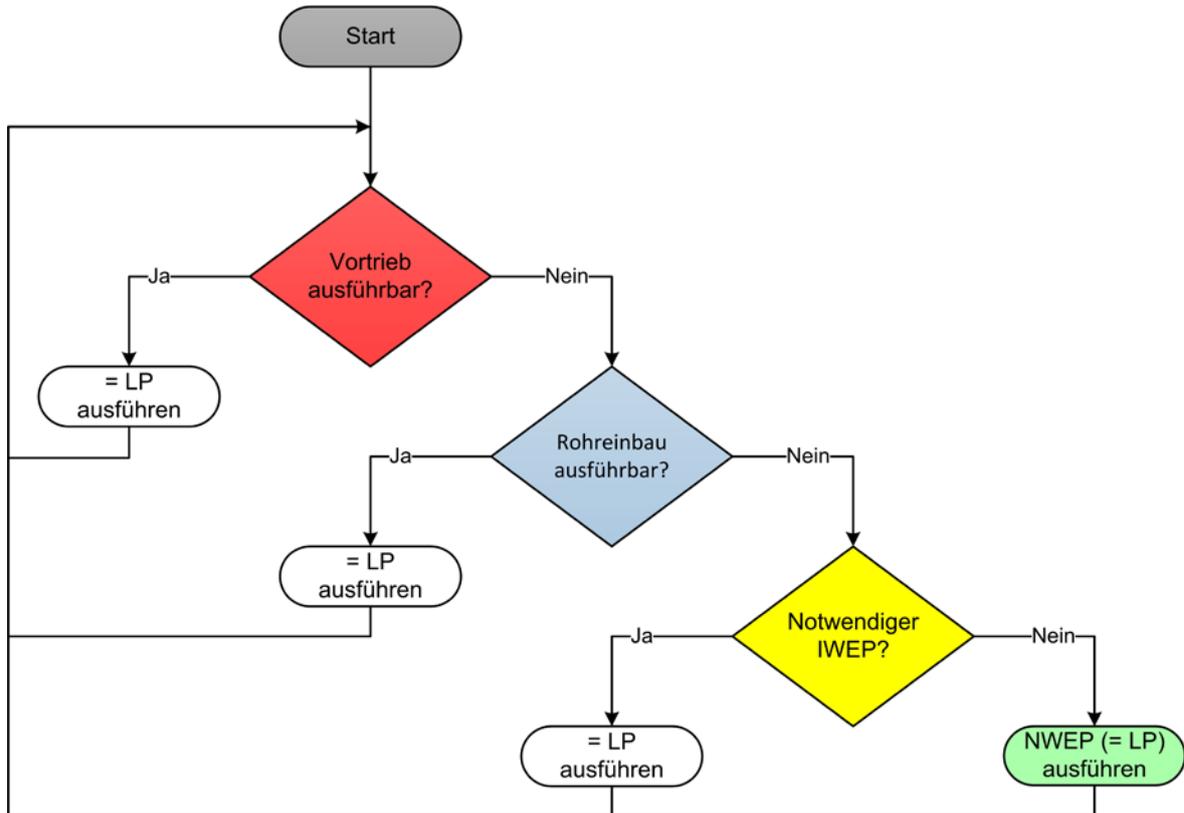


Abb. 56: Flussdiagramm Identifizierung des Leitprozess im Rohrvortrieb mit 2 DWEP ⁴⁵³

⁴⁵³ Die Farben Rot für „Bohren / Vortrieb“, Blau für den „Rohreinbau“, Gelb für die „Unterstützungsprozesse“ und Grün für die „Störprozesse“ stammen aus der von *Wayss & Freytag* verwendeten Software zur Prozessdokumentation. Sie wurde aus Gründen der Verständlichkeit und Gewohnheit übernommen und haben keinen Bezug zu einem Ampelsystem oder ähnlichem.

Die Prozesskategorien lassen sich folgendermaßen auf die Prozesse des Rohrvortriebs übertragen:

DWEP / Schlüsselprozesse (SP)

Zur ersten Prozesskategorie zählen die Prozesse der übergeordneten Gruppen des Vortriebs / Bohrens (inkl. Abtransport) und des Rohreinbaus. Diese DWEP bestimmen die Kapazität (= Vortriebsgeschwindigkeit und -häufigkeit) und erzeugen den tatsächlichen Wert des Rohrvortriebs. Sinkt die Kapazität dieser Prozesse, so sinkt auch die Gesamtkapazität und die Kosten (z.B. durch Miet-, Lager- oder Stromkosten) steigen. Fällt ein Prozess dieser beiden Prozessgruppen dauerhaft aus, kommt es zum Erliegen des Tunnelbauprojekts⁴⁵⁴. Somit haben alle Aktivitäten Priorität (= Ausführung des Leitprozesses hat die höchste Priorität), die dafür sorgen, dass sowohl der Vortrieb wie auch der Rohreinbau gemäß ihrer möglichen Kapazität ausgeführt werden können. In Abb. 56 ist dargestellt, dass der Vortrieb i.d.R. der erste auszuführende Leitprozess ist, bis dieser nicht mehr weiter möglich ist. Dies ist der Fall wenn die Regellänge des nächsten einzubauenden Rohres erreicht ist. Im Prozessmodell hinterlegt sind (bisher) 13 DWEP, wovon sechs dem Vortrieb und sieben dem Rohreinbau zuzuordnen sind.

Zu den übergeordneten DWEP Prozessgruppen des Vortriebs und des Rohreinbaus zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Vortrieb
Regelvortrieb
Dehnerfahren im VT-Stillstand
Ausfahrvorgang
Einfahrvorgang
Hindernisbeseitigung mittels Vortrieb
Durchfahren Zwischenschacht

Tabelle 8: Beispiele für Prozesse der DWEP-Gruppe Vortriebsprozesse

Rohreinbau
Rohreinbau
Einbau Dehner
Einbau Maschinenrohr 1
Einbau Maschinenrohr 2
Einbau Schleuse

Tabelle 9: Beispiele für Prozesse der DWEP-Gruppe Rohreinbauprozesse

⁴⁵⁴ Einige Prozesse werden nur selten oder einmal während des Projektes ausgeführt, jedoch der Vollständigkeit wegen in den Prozesskategorien mitaufgeführt.

IWEP / Unterstützungsprozesse (UP)

Die zweite Prozessgruppe bilden die IWEP. Verhindern Prozesse dieser Gruppe die Ausführung der DWEP, welche zusätzlich auf dem Kritischen Weg liegen, so senken sie die mögliche Vortriebsgeschwindigkeit. Dies kann in bestimmten Fällen durch ihre Notwendigkeit bedingt unvermeidbar sein. In diesem Fall sind diese IWEP auch als Systembedingte Ausfallzeiten zu bezeichnen. Diese Prozesse erzeugen somit keinen direkten Wert, sind jedoch für die Werterzeugung notwendig.

Ein wichtiger Aspekt des Prozessmodells ist der flexible Einsatz dieser Prozessgruppe. Werden die IWEP zu den falschen Zeitpunkten ausgeführt und zu unflexibel zeitlich eingeplant (z.B. ist ein früherer oder späterer Beginn möglich, wird jedoch nicht berücksichtigt), wird die Vortriebsgeschwindigkeit durch die Störung bzw. Nicht-Ausführung des Leitprozesses (DWEP auf Kritischem Weg) maßgeblich (negativ) beeinflusst. Im Prozessmodell hinterlegt sind (bisher) 23 IWEP.

Zur übergeordneten Prozessgruppe der Unterstützungsprozesse / Systembedingten Ausfallzeiten zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Unterstützungsprozesse
Förderkreislauf fahren
Kabelverlängerung TBM
Kabelverlängerung Pumpe
Kontrollvermessung
Rohrausstattung
Auffüllen Hydrauliköl

Tabelle 10: Beispiele für Prozesse der IWEP-Gruppe Unterstützungsprozesse

Ist weder der Vortrieb noch der Rohreinbau möglich, wird geprüft, ob die Ausführung eines IWEP notwendig ist. In diesem Fall wird der IWEP zum Leitprozess und ist als Systembedingte Ausfallzeiten zu bezeichnen. Sobald dieser beendet ist, wird erneut geprüft, ob ein DWEP ausführbar ist.

Gemäß des zweiten Schrittes der Optimierung (siehe folgende Abb.) ist mit dem Prozessmodell weiterhin stets überprüfbar, ob ein IWEP parallel zu einem DWEP oder zu einem notwendigen IWEP (Systembedingte Ausfallzeiten) ausführbar ist (siehe Abb. 59).

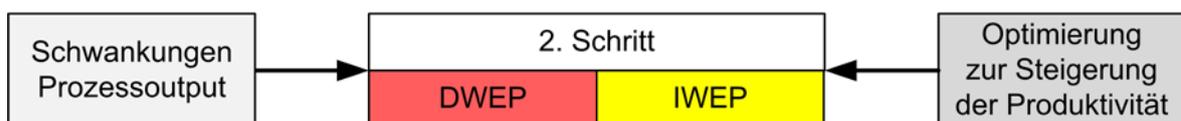


Abb. 57: Zweiter Schritt zur Produktivitätssteigerung

NWEP / Störprozesse (StP)

Die dritte Prozesskategorie bilden die Prozessgruppen der NWEP (= Behebung von Störungen). Diese senken ebenfalls die mögliche Vortriebsgeschwindigkeit, da auch sie die Ausführung der DWEP verhindern. Sie erzeugen keinen Wert, verursachen aber Verzögerungen, Kosten und somit Verschwendung, weshalb Störungen unter allen Umständen zu vermeiden sind. Ist weder der Vortrieb noch der Rohreinbau oder ein IWEP möglich, ist eine Störung zu beheben. In diesem Fall wird der NWEP zum Leitprozess. Sobald die Störung behoben ist, wird erneut geprüft, ob die DWEP ausführbar sind. Zu den NWEP im Rohrvortrieb zählen die Prozessgruppen der Wartezeiten, der Betriebsstörungen (BS) der Tunnelbohrmaschine bzw. des Schneidrads, BS des Tunnels bzw. Schachtes, BS der Baustelleneinrichtung und Logistik, BS der Separieranlage sowie die Behebung sonstiger Störungen. Im Prozessmodell hinterlegt sind (bisher) 88 NWEP.

Zur übergeordneten Prozessgruppe der Wartezeiten zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Wartezeiten
Warten auf Vortriebsrohre
Warten auf Schmiersuspension
Warten auf Ersatzteile
Warten auf Bodenabfuhr
Austausch Suspension
Austausch Vortriebsrohr

Tabelle 11: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Wartezeiten

Zur übergeordneten Prozessgruppe der Betriebsstörung der TBM zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Betriebsstörung TBM
Betriebsstörung TBM - hydraulisch
Betriebsstörung TBM - elektrisch
Betriebsstörung TBM - mechanisch
Betriebsstörung Schneidrad
Betriebsstörung Schleuse
Reinigung Abbaukammer

Tabelle 12: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Betriebsstörung TBM

Zur übergeordneten Prozessgruppe der Betriebsstörungen bzgl. des Tunnels zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Betriebsstörung Tunnel
Betriebsstörung Hauptpressenstation
Betriebsstörung Rohrbremse
Betriebsstörung Dehnerstation
Betriebsstörung Widerlager
Betriebsstörung Förderpumpe
Betriebsstörung Baustellenlift

Tabelle 13: Beispiele für Prozesse der NWEP-Gruppe Betriebsstörung Tunnel

Zur übergeordneten Prozessgruppe der Betriebsstörungen der Baustelleneinrichtung zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Betriebsstörung Baustelleneinrichtung
Betriebsstörung Druckluftregelanlage
Betriebsstörung Hebegerät – mech.
Betriebsstörung Hebegerät – elekt.
Betriebsstörung wasserversorgung
Betriebsstörung Radlader
Betriebsstörung Rohrleitung

Tabelle 14: Beispiele für Prozesse der NWEF-Gruppe Betriebsstörung BE

Zur übergeordneten Prozessgruppe der Betriebsstörungen der Separieranlage zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Betriebsstörung Separieranlage
Betriebsstörung SA - mechanisch
Betriebsstörung SA - elektrisch
Reinigung SA
Betriebsstörung Betonitmischanlage
Betriebsstörung Speisepumpe
Betriebsstörung Vorpresspumpe

Tabelle 15: Beispiele für Prozesse der NWEF-Gruppe Betriebsstörung Separieranlage

Zur übergeordneten Prozessgruppe der sonstigen Störungen zählen u.a. die folgenden Prozesse:

Sonstige
Setzung / Hebung
Tagbruch
Brand
Unfall
Rettungsübung
Hochwasser

Tabelle 16: Beispiele für Prozesse der NWEF-Gruppe Sonstige NWEF

Abb. 58 zeigt beispielhaft die beim Rohrvortrieb vorkommenden Schlüsselprozesse (DWEF), Unterstützungsprozesse / Systembedingte Ausfallzeiten (IWEF) und Störprozesse (NWEF). Im Prozessmodell hinterlegt sind (bisher) insgesamt 124 Prozesse.

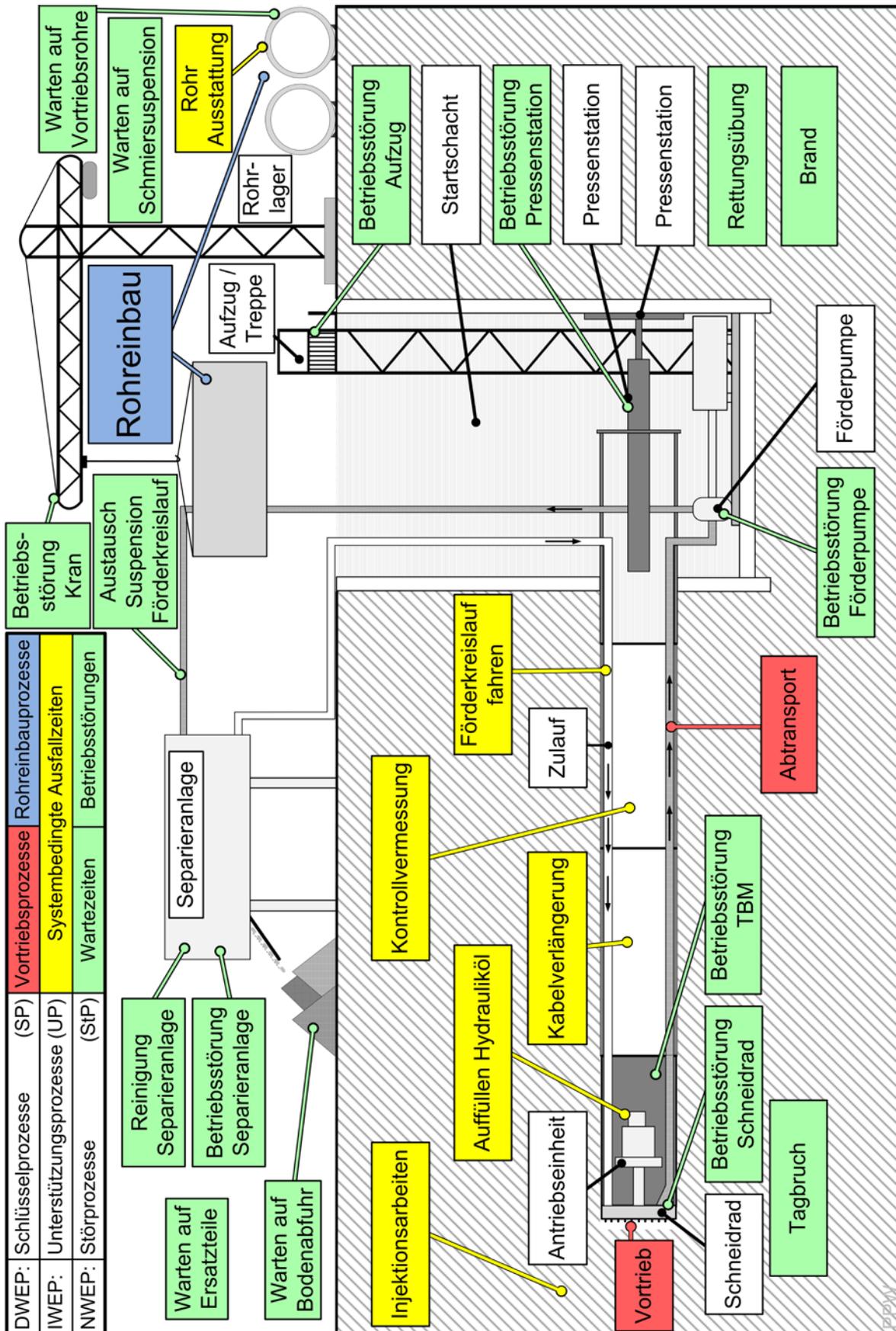


Abb. 58: Prozesse/Prozesskategorien im Rohrvortrieb⁴⁵⁵

⁴⁵⁵ Eigene Darstellung in Anlehnung an Maidl, 2011, S.361.

8.4 Ermittlung, Optimierung und Nutzung Prozesse Rohrvortrieb

Im vorangegangenen Abschnitt wurde erläutert, dass durch die Ermittlung des Leitprozesses zu jedem Zeitpunkt der zu priorisierende Prozess ermittelt werden kann, damit die DWEP gemäß ihrer Kapazität laufen können. Zusätzlich sind weitere Unterziele für diesen Zweck zu erfüllen. So sind zukünftige IWEP und NWEP zu ermitteln, um diese vorgezogen ausführen zu können. Die erfassten Prozesse sind zu dokumentieren und so aufzubereiten, dass sie nutzbringend eingesetzt werden können. Sowohl bei den ersten beiden Schritten der Optimierung sind diese Informationen zur Ablaufplanung der DWEP und IWEP zu verwenden wie auch beim dritten Schritt, wenn zusätzlich notwendige NWEP zu berücksichtigen sind.

8.4.1 Ermittlung zukünftiger IWEP und NWEP

Mit dem Prozessmodell soll sichergestellt werden, dass im Falle eines Stillstandes die Zeit dieses möglichst optimal genutzt wird und dass die in dieser Zeit freigewordenen Ressourcen optimal genutzt werden. Hierzu sollen mit dem Prozessmodell während eines Stillstandes weitere zukünftige, die Kapazität der DWEP verringernde Stillstände erkannt werden, um diese, falls möglich, bereits in der Zeit des aktuellen Stillstandes zu beheben bzw. ihr Auftreten präventiv zu verhindern.

Um dies zu erreichen, werden mit dem Prozessmodell, im Falle eines Stillstandes, alle Prozesse ermittelt, die parallel zum stillstandverursachenden Prozess ausführbar sind. Auch beim Rohrvortrieb erfolgt die Ermittlung dieser möglichen Parallelprozesse in einem ersten Schritt anhand bestimmter Kriterien. Die möglichen Parallelprozesse werden dann in einem zweiten Schritt bezüglich ihres zukünftigen Einflusses mithilfe verschiedener Filter geordnet. Ist die Ausführung dieser Prozesse bereits früher als geplant während des aktuellen Stillstandes möglich, kann somit ihr zukünftiger (negativer) Einfluss auf den Vortrieb und den Rohreinbau reduziert bzw. ganz verhindert werden.

Der gesamte Ablauf des Prozessmodells beim Rohrvortrieb wird im Abs. 8.5 erläutert, das Ablaufschema der Ermittlung, parallele (und vorgezogenen) Ausführung von zukünftigen IWEP und NWEP wird in Abb. 59 dargestellt.

8.4.2 Dokumentation zur kontinuierlichen Verbesserung

Zur Optimierung des Ablaufs ist es gerade bei kurzzyklisch zu wiederholenden Prozessen, wie es der Rohrvortrieb ist, wichtig, die einzelnen Prozesse so genau wie möglich zu dokumentieren. Auf diese Weise sind Erfahrungen schon bei der nächsten Durchführung eines bestimmten Prozesses nutzbar. Dieser „Kontinuierliche Verbesserungsprozess“ (KVP) soll mit dem Prozessmodell erreicht werden, indem alle Prozesse und insbesondere die Stillstände bzgl. ihrer Ursachen, Häufigkeit, Dauer und ihres Ressourcenverbrauchs ermittelt, analysiert und dokumentiert werden, um sie zukünftig (kurzfristig, innerhalb des Projektes; langfristig, für folgende Projekte) zu berücksichtigen.

Mit dem Prozessmodell werden die DWEP (Vortriebs- und Rohreinbauprozesse), IWEP und bereits bekannte (in der Vergangenheit aufgetretene) sowie neue NWEP berücksichtigt, erfasst und vollumfänglich dokumentiert. Anhand der hierbei gewonnenen Informationen werden zukünftig die stillstandverursachenden Prozesse zunehmend genauer berücksichtigt und somit die Kapazität des Vortriebs und des Rohreinbaus erhöht und Verschwendungen minimiert bzw. gänzlich eliminiert. Um dies zu erreichen, werden die ermittelten Daten

mit dem Prozessmodell nicht nur dokumentiert (aufgelistet), sondern zusätzlich umgehend in die Prozessinformationen des Modells eingespielt. Die ermittelten Daten können somit noch innerhalb des Rohrvortriebprojekts genutzt werden.

8.4.3 Zusammenfassung der Ziele des Prozessmodells beim Rohrvortrieb

Beim Zielsystem des Prozessmodells bauen die Ziele auch beim Rohrvortrieb aufeinander auf bzw. ergänzen sich und sind folgendermaßen zu beschreiben:

- **Ziel 1:** Sicherstellung, dass die Vortriebs- und Rohreinbauprozesse (= DWEP) gemäß ihrer Kapazität (= so oft wie möglich, so lange wie möglich) ausführbar sind.
- **Ziel 2:** Sicherstellung, dass zu jedem Zeitpunkt der zu priorisierende Prozess herausgestellt werden kann (= Leitprozess), damit entweder Ziel 1 erfüllt wird oder die Vortriebs- und Rohreinbauprozesse nach einem Stillstand gemäß ihrer Kapazität ausführbar sind.
- **Ziel 3:** Sicherstellung, dass während eines Stillstands weitere zukünftige, die Kapazität der Vortriebs- und Rohreinbauprozesse verringernde Stillstände (IWEP oder NWEPE), erkannt werden und diese bereits in der Zeit des aktuellen Stillstandes, falls möglich, parallel ausgeführt werden.
- **Ziel 4:** Sicherstellung, dass alle Prozessdaten der DWEP, IWEP und NWEPE sowie die Ursachen für Stillstände und Abweichungen ermittelt, analysiert, dokumentiert und zukünftig berücksichtigt werden.

8.4.4 Leitprozessauswahl und Entscheidung über Parallelprozesse im Rohrvortrieb

Um zu jedem Zeitpunkt zu ermitteln, welcher Prozess für die Optimierung des Gesamtprozesses am sinnvollsten ist, wurde der Begriff des Leitprozesses definiert. Mit der Bestimmung dieses ist eindeutig, welcher Prozess zum jeweiligen Zeitpunkt priorisiert, also ausgeführt werden sollte. In der folgenden Abbildung sind alle Ziele, die mit dem Prozessmodell beim Rohrvortrieb erreicht werden sollen, in ein Gesamtablaufschema eingearbeitet. Mithilfe dieses Schemas wird sichergestellt, dass die Vortriebs- und Rohreinbauprozesse (= DWEP) gemäß ihrer Kapazität ausgeführt werden, dass zu jedem Zeitpunkt der Leitprozess herausgestellt werden kann, dass während eines Stillstands weitere zukünftige, die Kapazität der DWEP verringernde Stillstände erkannt werden und diese in der Zeit des aktuellen Stillstandes, falls möglich, behoben werden. Zudem werden die Prozesse umgehend dokumentiert und zukünftig berücksichtigt. Die Ermittlung und Bewertung dieser parallel ausführbaren Prozesse wird im folgenden Abs. 8.5 erläutert.

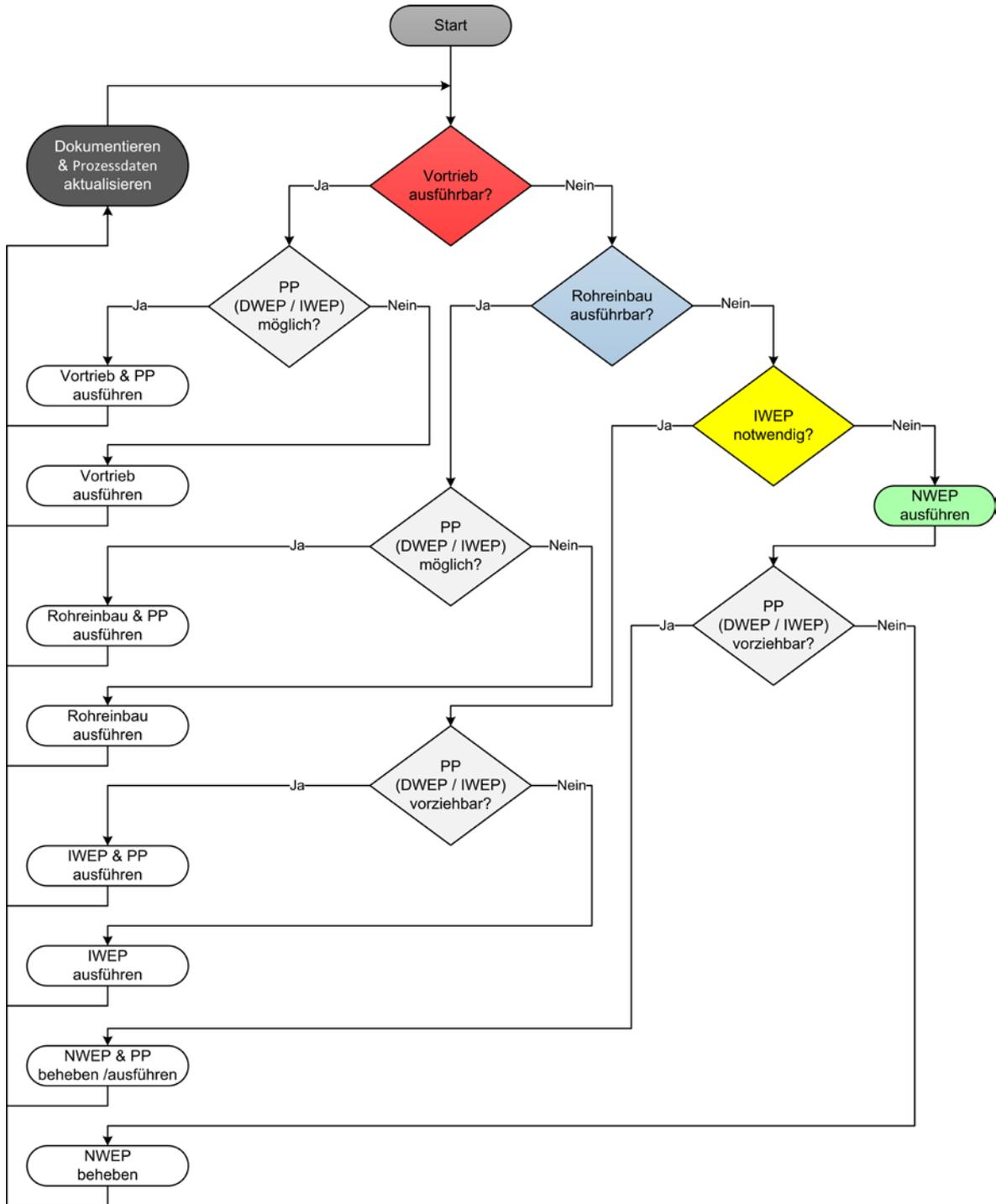


Abb. 59: Ablaufschema Prozessmodell - Leitprozess und Parallelprozess Rohrvortrieb

8.5 Kriterien und Filter des Prozessmodells - Rohrvortrieb

Mit dem Prozessmodell werden Prozesse ermittelt, die zukünftig ebenfalls einen Stillstand verursachen werden und insbesondere während eines Stillstandes⁴⁵⁶ unter den aktuellen Randbedingungen des Rohrvortriebs (Dauer, Ressourcen, Platz, Lärm) parallel zum stillstandverursachenden Prozess ausführbar sind. Ein Stillstand wird entweder durch einen notwendigen Unterstützungsprozess (IWEP) oder einen Störprozess (NWEPE) verursacht. Sobald ein Stillstand und sein verursachender Prozess bekannt sind, wird ermittelt, ob die parallele Ausführung weiterer Prozesse während dieses Prozesses möglich und, mit Blick auf den gesamten Rohrvortrieb, sinnvoll ist. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Prozesse, deren Ausführung parallel **möglich** ist, anhand von **Kriterien** ermittelt. Sollten mehrere Prozesse parallel möglich sein, werden diese Prozesse in einem zweiten Schritt bzgl. ihres zukünftigen Einflusses **sinnvoll** anhand von **Filtern geordnet** (= priorisiert). Das verantwortliche Personal bekommt somit eine Entscheidungshilfe mit sinnvollen Vorschlägen für den weiteren Rohrvortriebsablauf gestellt.

Ablauf Prozessmodell

Der Ablauf mit dem das Prozessmodell Parallelprozesse des Rohrvortriebs ermittelt, erfolgt wie im Kapitel 7.7 beschrieben.

Die allgemeine Angaben bzgl. der Baustelle / des Projekts (Projektname, Starttermin der Bauproduktion, verfügbare Ressourcen) sind zu Beginn der Bauarbeiten im Zuge der Arbeitsvorbereitung im Prozessmodell zu hinterlegen, ebenso wie spezifische Angaben bzgl. der Prozesse (Technische Möglichkeit zur Ausführung parallel zu anderen Prozessen, Prozessdauer, Ressourcenverbrauch, Abhängigkeiten, Häufigkeit, zyklische Fälligkeit). Diese können aus einem früheren, vergleichbaren Projekt übernommen werden, sind jedoch zu kontrollieren und ggf. auf das jeweilige Projekt anzupassen.

Zur Ermittlung der möglichen und sinnvollen Parallelprozesse sind die folgenden vier Schritte nötig:

1. Die Angaben bzgl. des aktuellen Rohrvortriebs (Ort und Zeit) und Datum werden automatisch aktualisiert oder sind manuell während des Baubetriebes einzutragen.
2. Es ist der Grund für den Stillstand zu bestimmen (= Leitprozess).
3. Zur Ermittlung der Vorschläge werden in einem ersten Schritt definierte Kriterien und in einem zweiten Schritt definierte Filter abgefragt.
4. Die Entscheidung für einen Parallelprozess und die Veranlassung erfolgt durch das verantwortliche Personal.

⁴⁵⁶ Auch die Ermittlung von Parallelprozessen für die DWEPE ist mit dem Prozessmodell möglich, jedoch liegt der Fokus des Prozessmodells auf dem dritten Schritt der Optimierung, für den Störfall.

8.5.1 Kriterien Rohrvortrieb

Mit der Kriterienabfrage werden die Prozesse ermittelt, die parallel zum aktuellen, den Stillstand verursachenden Prozess ausführbar sind. Hierfür werden automatisch bestimmte Kennzahlen bzgl. des aktuellen Zustands des Vortriebs, der laufenden Prozesse⁴⁵⁷, der Ressourcen in Verwendung, der insgesamt verfügbaren Ressourcen, des Ortes des Vortriebs (Tunnelmeter), der Dauer des Vortriebs (produktive Vortriebs- bzw. Arbeitszeit) und der Dauer des aktuellen Leitprozesses gegenübergestellt und miteinander abgeglichen. Alle vor Beginn des Projektes im Modell hinterlegten Prozesse stehen in einer Liste für diese Abfrage zur Verfügung. Mit dieser werden alle Kriterien nacheinander abgefragt, wobei die Reihenfolge der Kriterien von keiner Bedeutung ist, da alle definierten Kriterien erfüllt werden müssen, damit ein Prozess parallel ausführbar ist.

Eingaben und Ablauf Kriterienabfrage

Um die Parallelprozesse für den Leitprozess zu ermitteln, sind folgende Schritte notwendig:

- Die Angaben bzgl. des aktuellen Baustellenzustandes (Ort und Zeit) und Datum (werden automatisch aktualisiert oder sind manuell einzutragen) sind zu kontrollieren.
- Der Leitprozess ist auszuwählen und das Prozessmodell ist zu starten.

Es wurden in der ersten Version des Prozessmodells drei Kriterien definiert, wobei nur das erste Kriterium (Technische Möglichkeit) tatsächlich Prozesse ausschließt. Da die notwendigen Ressourcen (Kriterium 2) beim Rohrvortrieb auf das Personal begrenzt sind und vom verantwortlichen Personal aufgrund der aufgabenübergreifenden Kompetenzen der Arbeiter in einem bestimmten Rahmen flexibel eingesetzt werden können, erfolgt lediglich ein Hinweis auf die Nicht-Erfüllung des Kriteriums. Ebenso werden die Prozesse, deren Prozessdauer (Kriterium 3) über die des Leitprozesses hinausgeht, nur farblich gekennzeichnet, um dem verantwortlichen Personal einen Handlungsspielraum zu gewähren.

Die drei Kriterien wurden für das Prozessmodell bei der ersten Anwendung im Rohrvortrieb ausgewählt, da sie dem ermittelten Zielsystem am meisten entsprechen und gut anhand von Kennzahlen abgefragt werden können.

Die Kriterien sind:

- | | |
|---------------------------|-----------------|
| 1. Technische Möglichkeit | (= Kriterium 1) |
| 2. Ressourcen | (= Kriterium 2) |
| 3. Prozessdauer | (= Kriterium 3) |

⁴⁵⁷ Eine Erweiterung des Modells sollte auch weitere Prozesse auf der Baustelle, welche planmäßig parallel ausgeführt werden und Ressourcen verbrauchen, berücksichtigen. Dieser Ansatz ist kann beispielsweise für den konventionellen Tunnelbau sinnvoll sein.

Die Kriterienabfrage läuft nach dem Starten des Prozessmodells automatisch nach den folgenden Schritten ab (siehe Abb. 60):

1. Als Ausgangsbasis steht eine Liste mit allen bekannten und dokumentierten Prozessen zur Verfügung. Diese Liste wird bzgl. der technischen Möglichkeit der parallelen Ausführung (= Kriterium 1) abgefragt.
2. Erfüllt ein Prozess Kriterium 1 nicht, so fällt er aus dieser Liste heraus. Erfüllt kein Prozess das erste Kriterium, so ist kein Parallelprozess möglich.
3. Abfrage Prozess(e) bzgl. der notwendigen Ressourcen (= Kriterium 2).
4. Erfüllt ein Prozess Kriterium 2 nicht, so wird dieser in der späteren Ausgabe farblich gekennzeichnet.
5. Abfrage Prozess(e) bzgl. der durchschnittlichen Prozessdauer (= Kriterium 3).
6. Erfüllt ein Prozess Kriterium 3 nicht, so wird dieser in der späteren Ausgabe farblich gekennzeichnet.
7. Erfüllen mehr als ein Prozess Kriterium 1, so sind diese in einem weiteren Schritt anhand von Filtern zu priorisieren, um zu ermitteln, für welchen dieser Prozesse das vorgezogene Ausführen am sinnvollsten ist. Erfüllt exakt ein Prozess Kriterium 1, so wird dieser Prozess als einziger möglicher Parallelprozess angezeigt.

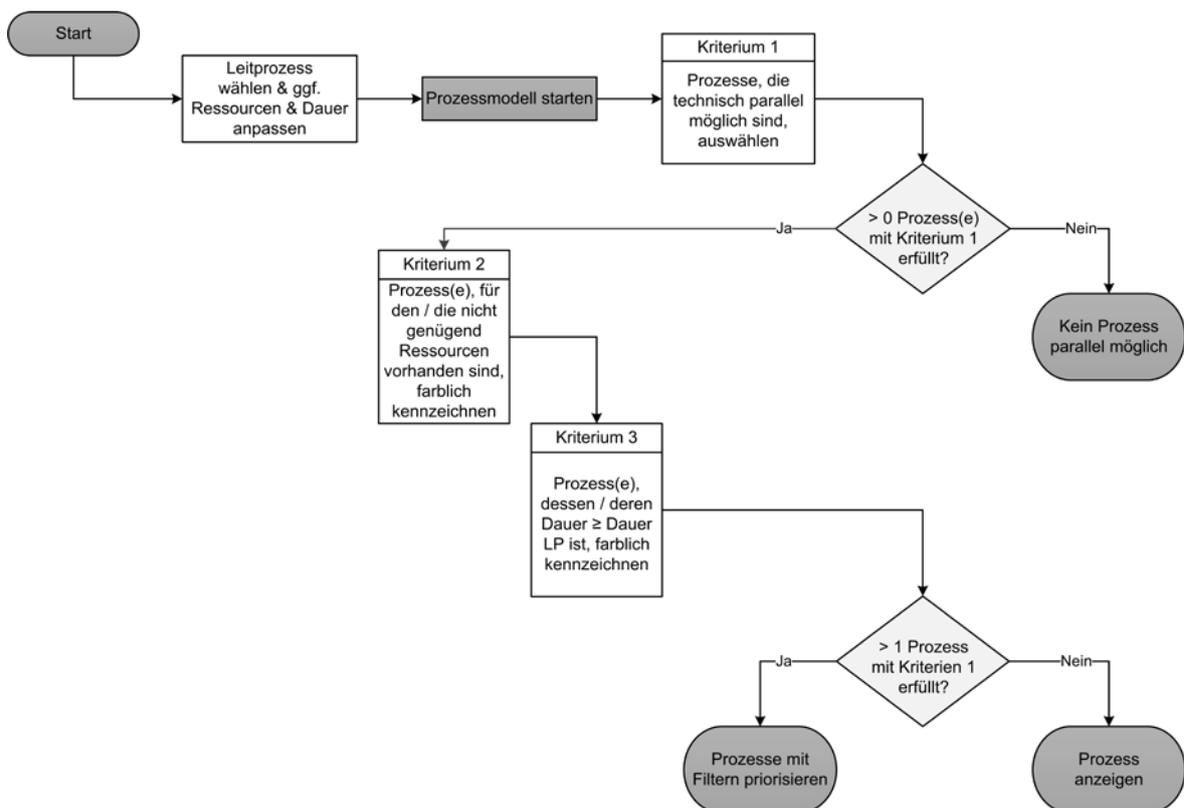


Abb. 60: Ablaufschema Kriterienabfrage Rohrvortrieb

Kriterium Technische Möglichkeit

Mit Kriterium 1 werden Prozesse ausgeschlossen, deren parallele Ausführung zum aktuellen Leitprozess aus technischen Gründen nicht möglich ist. Zu diesen ausschließenden Gründen werden folgende gezählt:

- Behinderung der Behebung des Störprozesses,
- Behinderung der Ausführung des Unterstützungsprozesses,
- Raumverfügbarkeit,
- räumliche Reihenfolge,
- zeitliche Reihenfolge
- und Sicherheitsaspekte.

Prozesse, welche den Leitprozess behindern, sind auszuschließen, da (nach Definition) die Ausführung des Leitprozesses immer Priorität hat. Ist der für einen Parallelprozess notwendige Raum nicht ausreichend (z.B. aufgrund des Raumanspruches des Leitprozesses), kann dieser nicht ausgeführt werden. Ist beispielsweise für die Behebung einer Störung eine große Maschine notwendig, schließt dies bereits einige Prozesse, welche ebenfalls viel Platz oder große Maschinen benötigen, aus. Weiterhin sind Prozesse, die innerhalb einer bestimmten räumlichen oder zeitlichen Reihenfolge zu erbringen sind, welche erst nach dem aktuellen Leitprozess liegen, auszuschließen. Zum Beispiel ist eine Kabelverlängerung erst nach dem Einbau eines neuen Rohres möglich. Kann die Sicherheit für Mensch und Maschine im Zeitraum des aktuellen Leitprozesses für die Ausführung der Parallelprozesse nicht gewährleistet werden, sind diese ebenfalls auszuschließen. Beispielsweise sind während einer Störung des Krans keine Arbeiten im Tunnelschacht zulässig, da der Kran selbst zur Rettung notwendig werden kann und unbedingt verfügbar sein muss. Wie die Kennzahlen für dieses Kriterium im Prozessmodell hinterlegt sind ist beispielhaft in Tabelle 21 dargestellt. Die Bestimmung der Technischen Möglichkeit erfolgt durch fachkundiges Personal.

Kriterium Ressourcen

Mit Kriterium 2 werden im verwendeten Prozessmodell keine Prozesse direkt ausgeschlossen. Allerdings werden die Prozesse, für die nach Abgleich mit den insgesamt zur Verfügung stehenden Ressourcen und den für die Erbringung des Leitprozesses benötigten Ressourcen nicht mehr ausreichend bzw. nur sehr knapp ausreichend Ressourcen zur Verfügung stehen, in der Ergebnisausgabe farblich markiert. Die begrenzenden Ressourcen unterscheiden sich auch beim Rohrvortrieb von Projekt zu Projekt. Es können materielle (Maschinen, Werkzeuge oder Werkstoffe) als auch immaterielle (Arbeitskräfte, Informationen oder Kapital) Bauproduktionsfaktoren mit diesem Kriterium betrachtet werden. Bereits erste Baustellenbesuche und Besprechungen mit den Direktbeteiligten zeigten, dass sich die Ressourcen beim Rohrvortrieb auf die Arbeitskräfte eingrenzen lassen. Die Baustellenmannschaft setzt sich i.d.R. aus einer bestimmten Anzahl von Kranfahrern, Schichtführern, Schildfahrern, Schlossern, Elektrikern, Mechanikern und Separieranlagenfahrern zusammen. Die begrenzenden Maschinenressourcen, wie z.B. der Kran oder die Separieranlage, sind so eng mit dem bedienenden Personal verbunden, dass eine gesonderte Berücksichtigung lediglich die Komplexität des Modells erhöhen würde. Hingegen hat sich die Flexibilität des Personals als Vorteil erwiesen. So kann bei Ausfall eines Krans der Kranführer

durch seine weitreichende Erfahrung bei anderen Prozessen (bspw. Pumpenkabelverlängerung) eingesetzt werden. Fällt jedoch der Kranfahrer aus, sind keine Arbeiten durchführbar, die einen Kran benötigen. Bei Verwendung des Prozessmodells werden die für den ausgewählten Leitprozess erwarteten Ressourcen aus den hinterlegten Daten ausgegeben. Zudem ist eine manuelle Anpassung dieser durch das verantwortliche Personal für den jeweiligen aktuellen Prozess möglich.

Beispiel

In Abb. 61 sind die insgesamt auf der Baustelle verfügbaren Ressourcen (weiß), die für die Ausführung des Störprozesses (= Leitprozess) „Betriebsstörung Widerlager“ nötigen Ressourcen (grau) sowie die nötigen Ressourcen für zwei Prozesse dargestellt. Für den Prozess „Auffüllen Hydrauliköl“ (grün) sind genug Arbeitskräfte übrig, für den Prozess „Kabelverlängerung Pumpe“ (rot) fehlen jedoch die bereits für die Behebung der Störung benötigten Ressourcen „Kranfahrer“, „Schichtführer“ und „Mechaniker“. Nach dem zweiten Kriterium ist somit nur der erste Prozess „Auffüllen Hydrauliköl“ als Parallelprozess möglich, der Prozess „Kabelverlängerung Pumpe“ erfüllt das zweite Kriterium nicht. Jedoch wird dieser nicht direkt ausgeschlossen. Die farbliche (rote) Markierung gibt dem verantwortlichen Personal den Hinweis zum Personalengpass. Dieses kann dann individuell entscheiden, ob die verfügbaren Arbeiter in anderer Funktion einsetzbar sind.

Verfügbare Ressourcen							Ressourcen - Betriebsstörung Widerlager (= LP)						
Kranfahrer	Schlosser	Schichtführer	Elektriker	Schild-fahrer	Separier-anlagen-fahrer	Mechaniker	Kran-fahrer	Schlos-ser	Schicht-führer	Elektri-ker	Schild-fahrer	Separier-anlagen-fahrer	Mecha-niker
1	2	1	2	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
Ressourcen - Auffüllen Hydrauliköl							Ressourcen - Kabelverlängerung Pumpe						
Kran-fahrer	Schlos-ser	Schicht-führer	Elektri-ker	Schild-fahrer	Separier-anlagen-fahrer	Mecha-niker	Kran-fahrer	Schlos-ser	Schicht-führer	Elektri-ker	Schild-fahrer	Separier-anlagen-fahrer	Mecha-niker
0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1

Abb. 61: Beispiel Kriterium Ressource

Kriterium Prozessdauer

Auch mit dem dritten Kriterium werden im Prozessmodell keine Prozesse direkt ausgeschlossen, was durch die ungenauen Kennzahlen begründet ist (zu geringe Anzahl Erfahrungsdaten und Schätzungen)⁴⁵⁸. Je nachdem, ob die Prozesse das Kriterium nicht bzw. nur sehr knapp erfüllen, werden sie in der Ergebnisausgabe farblich markiert. Auf diese Weise wird das verantwortliche Personal darauf hingewiesen, dass ein Parallelprozess möglicherweise länger dauert als der Leitprozess. Dies würde die Ausführung des folgenden DWEP (werden i.d.R. zum nächsten Leitprozess) oder die Behebung einer weiteren Störung verhindern. Der anfangs parallel ausgeführte Prozess würde in diesem Fall zu einer neuen Störung werden (Priorisierung Leitprozess).

⁴⁵⁸ Siehe hierzu Anlage 5: Stillstandauswertung (beispielhafter Auszug).

Daten Prozessdauer Prozessmodell

Das Prozessmodell gibt die erwarteten Prozessdauern automatisch aus hinterlegten Daten aus. Bei diesen handelt es sich um deterministische Werte, die vom verantwortlichen Personal zu überprüfen sind und der Situation manuell angepasst werden können. Dies kann notwendig werden, wenn erkannt wird, dass es sich um eine besonders schwere (oder geringe) Störung handelt und eine deutlich länger (oder kürzer) Behebungsdauer zu erwarten ist. Dies ist durchaus möglich, da die Kennzahlen nur teilweise aus Erfahrungswerten gebildet wurden⁴⁵⁹, größtenteils jedoch individuell durch Experten (direkt beteiligte Bauleiter W&F⁴⁶⁰) als erste Schätzwerte bestimmt wurden. Durch die Anwendung des Prozessmodells in vergleichbaren Projekten und durch eine kontinuierliche Dokumentation (ggf. direkt mit dem Modell) kann eine größere Datenmenge für alle auftretenden Prozesse erreicht werden, welche zukünftig für fundierte Kennzahlen im Prozessmodell genutzt werden kann. Bis diese Basis besteht, sind die erwarteten Prozessdauern stets kritisch zu überprüfen.

Beispiel Kriterium Prozessdauer

In der folgenden Abbildung sind die farblichen Markierungen potentieller Parallelprozesse dargestellt. Für den Leitprozess „Betriebsstörung Widerlager“ wird eine Behebungsdauer von 30 Minuten erwartet. Die Prozesse 306 und 301 sind in dieser Zeit möglich (schwarze Schrift auf grünem Grund). Prozesse, für die die gleiche Dauer erwartet wird wie für den Leitprozess, werden durch rote Schrift auf grünem Grund kenntlich gemacht. Prozesse, die länger als der Leitprozess dauern, sind auf rotem Grund dargestellt. Die Dauern sind vom verantwortlichen Personal kritisch zu hinterfragen. In diesem Beispiel werden die Werte als realistisch angesehen und übernommen.

Leitprozess			
Prozess wählen		Erwartete Dauer [min]	
605		Betriebsstörung Widerlager	
		30 min	
Parallelprozess(e)			
Rang	Prozessnummer	Prozessname	Zeit [min]
1	306	Auffüllen Hydrauliköl	15
2	301	Förderkreislauf fahren	10
3	303	Kabelverlängerung Pumpe	60
4	302	Kabelverlängerung TBM	60
5	304	Kontrollvermessung	180
6	324	Rohr Ausstattung	30
7	504	Betriebsstörung Schneidrad - elektrisch	30
8	506	Betriebsstörung Schneidrad - mechanisch	30
9	505	Betriebsstörung Schneidrad - hydraulisch	30
10	314	Entleeren Förderkreislauf	30
11	315	Auffüllen Förderkreislauf	30

Abb. 62: Beispiel Darstellung Kriterium Prozessdauer⁴⁶¹

⁴⁵⁹ Siehe hierzu Anlage 5: Stillstandauswertung (beispielhafter Auszug).

⁴⁶⁰ Wayss & Freytag Ingenieurbau AG.

⁴⁶¹ Für die Arbeit optimierter Screenshot des Prozessmodells.

Anwendung der Prozessdauer als probabilistische Variablen in Modell

Als Alternative zur Verwendung von deterministischen Kennzahlen, sind probabilistische Wertebereiche der Prozessdauern als Kriterium denkbar. Anhand von Simulationen können die Prozessdauern, die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Prozesse und deren Einfluss abgeschätzt werden. Erste Berechnungen hierzu liefert *Bitzka* in seiner Untersuchung der Prozessdauern bestimmter Rohrvortriebsprozesse. In dieser wird ermittelt mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Parallelprozess während eines Stillstands (= während des Leitprozesses) abgeschlossen ist. Zu diesem Zweck wurde das Simulationsprogramm *@Risk*⁴⁶² genutzt.⁴⁶³ Mit diesem lassen sich aus empirischen Werten Wahrscheinlichkeitsverteilungen erstellen, anhand derer probabilistische Untersuchungen möglich sind. Unter Verwendung von Erfahrungswerten (Daten vergleichbarer Tunnelvortriebsprojekte) wurden erste Berechnungen durchgeführt. Auch die hierbei ermittelten Werte können aufgrund der geringen Datenmenge nur als erste Schätzungen gesehen werden und dienen dem Zweck der Methodenbeschreibung. Ein Beispiel ist im Folgenden gegeben.

Beispiel alternative Anwendung der Prozessdauer als Kriterium

Als Leitprozess wurde beispielhaft die „Betriebsstörung Schneidrad“, als mögliche Parallelprozesse die „Kabelverlängerung“ und das „Förderkreislauf fahren“ ausgewählt. Die in Abb. 63 dargestellten erwarteten Prozessdauern (deterministische Werte, geschätzt von direkt beteiligten Bauleitung) dienen als Referenz und zeigen an, dass bei der Verwendung des Prozessmodells mit deterministischen Werten der Prozess „Förderkreislauf fahren“ möglich ist, die „Kabelverlängerung“ jedoch nicht.

Leitprozess			
Prozess wählen		Erwartete Dauer [min]	
504		Betriebsstörung Schneidrad	
		30	
Parallelprozess(e)			
Rang	Prozessnummer	Prozessname	Erwartete Dauer [min]
1	302	Kabelverlängerung	60
2	301	Förderkreislauf fahren	10

Abb. 63: Beispiel alternative Anwendung Dauer - Referenzwerte (deterministisch)

Für diese drei Prozesse wurden von *Bitzka* dokumentierte Daten vergleichbarer Tunnelvortriebsprojekte herangezogen und anhand dieser Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Prozessdauern ermittelt. Hierbei wurde ausgewertet wie häufig die dokumentierten Prozessdauern für die jeweiligen Prozesse aufgetreten sind. Diese Werte wurden in *@Risk* eingegeben, das Programm errechnet aus diesen Datensätzen Verteilungsfunktionen mit Hilfe von wie im Folgenden beschriebenen Monte-Carlo-Simulationen. Diese können anschließend ausgewertet werden.⁴⁶⁴

⁴⁶² Das Programm *@RISK* ist Bestandteil der „DecisionTools Suite“ der Firma Palisade.

⁴⁶³ Vgl. *Bitzka*, 2018, S.19 ff.

⁴⁶⁴ Vgl. ebenda, S.20.

Anwendung der Monte-Carlo-Simulation

Bei der Monte-Carlo-Simulation handelt es sich um ein numerisches, stichprobentheoretisches Simulationsverfahren zur Lösung mathematischer Problemstellungen.⁴⁶⁵ Bei diesem Verfahren werden Zufallszahlen zur Bestimmung von Zielgrößen genutzt,⁴⁶⁶ wobei durch das mehrmalige Ziehen von Zufallszahlen zufällige Stichproben bestimmt werden, welche dazu dienen eine Näherungslösung zu ermitteln. Die bestehenden Einzelwerte werden auf diese Weise zu einer Gesamtwahrscheinlichkeit zusammengeführt.⁴⁶⁷

Als Grundlage für die Simulation können sowohl deterministische als auch stochastische Eingangswerte verwendet werden.⁴⁶⁸ Aus diesen Werten lässt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und die zugehörigen statistischen Kenngrößen einer definierten Zielgröße bestimmen. Hierfür sind mindestens eine stochastische Eingangsgröße und eine Funktion zur Bestimmung des gesuchten Zielwertes notwendig. Die stochastischen Eingangsgrößen (Zufallsvariablen) sind in einem ersten Schritt als Verteilungsfunktionen zu beschreiben.⁴⁶⁹

Anhand der daraus ermittelten Einzelwerte und der definierten Funktion, erfolgt die Berechnung der Zielgröße. Die dabei berechneten Ergebnisse werden zwischengespeichert und dieser Vorgang so oft wiederholt, bis eine ausreichende Stabilität der Zielgröße erreicht wurde, um auf die Grundgesamtheit schließen zu können.⁴⁷⁰ Hierbei werden für jeden neuen Berechnungsdurchlauf neue, unabhängige Zufallszahlen und daraus folgende Stichprobenwerte der einzelnen stochastischen Eingangsgrößen gebildet. Jeder Simulationslauf entspricht letztlich einer Kombination von völlig zufälligen, unabhängigen Ereignissen.⁴⁷¹

Mit Hilfe der gespeicherten Ergebnisse wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße in Form einer Verteilungsfunktion bestimmt.⁴⁷² Zu beachten ist hierbei, dass es sich bei der ermittelten Zielgröße um eine Näherungslösung handelt, da das Ergebnis lediglich aus einer Stichprobe mit begrenztem Umfang bestimmt wurde.

Beispiel Anwendung der Monte-Carlo-Simulation Kriterium Prozessdauer

Im oben begonnenen Beispiel werden für die drei ausgewählten Prozesse die Häufigkeiten der Prozessdauern (als deterministische Werte) für die jeweiligen Prozesse herangezogen. Diese Werte werden in *@Risk* eingegeben, das Programm bietet für diese eine Verteilungsanpassung - deren Verteilungskurve⁴⁷³ die Werte am besten widerspiegeln - an.⁴⁷⁴

⁴⁶⁵ Vgl. Hengartner & Theodorescu, 1978, S.11, vgl. Hildenbrand, 1988, S.47, vgl. Schneeweiss, 1969, S.129

⁴⁶⁶ Vgl. Cottin & Döhler, 2013, S.405

⁴⁶⁷ Vgl. Fishman, 1996, S.1, vgl. Steiger, 2009, S.70, vgl. Weig, 2008, S.109

⁴⁶⁸ Vgl. Hildenbrand, 1988, S.49

⁴⁶⁹ Vgl. Finke, 2005, S.103

⁴⁷⁰ Vgl. Gleissner, 2008, S.144, vgl. Hill, 2012, S.98

⁴⁷¹ Vgl. Rau et al., 2007, S.5

⁴⁷² Vgl. Wiedenmann, 2005, S.134

⁴⁷³ Es werden verschiedene Verteilungskurven angeboten, aus diesen kann gewählt werden.

⁴⁷⁴ Vgl. Bitzka, 2018, S.20

Für die in Tabelle 17 gegebenen Werte für die Häufigkeiten der Prozessdauern der „Betriebsstörung Schneidrad“ wird die in Abb. 64 dargestellte Verteilungskurve gewählt.

Betriebsstörung Schneidrad	
Häufigkeit	Prozessdauer [min]
1	55, 60, 70, 75, 115, 135, 165, 180, 200, 215, 330
2	30
3	35
4	25
6	10, 15
9	20

Tabelle 17: Häufigkeiten Prozessdauern - Betriebsstörung Schneidrad

Der im Prozessmodell verwendete Referenzwert der Prozessdauer für die Behebung der „Betriebsstörung Schneidrad“ von 30 Minuten würde in ca. 66 % der Fälle erreicht bzw. unterschritten werden.

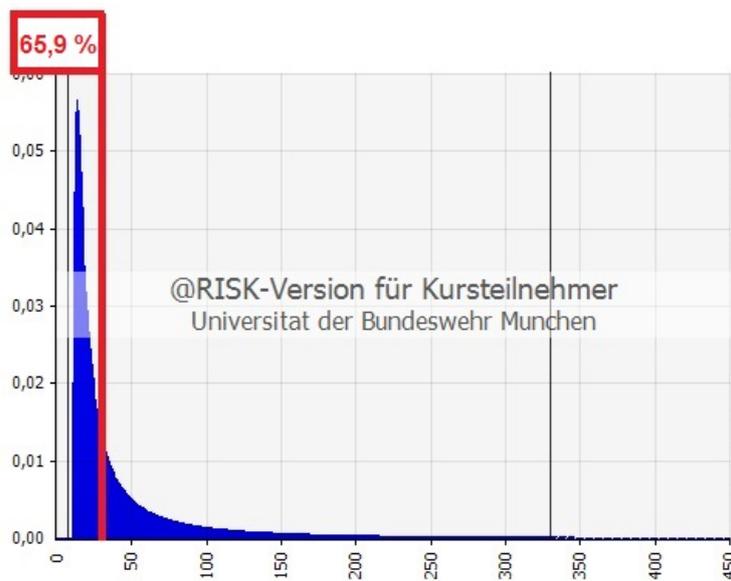


Abb. 64: Verteilungskurve, Häufigkeiten Prozessdauern - Betriebsstörung Schneidrad⁴⁷⁵

⁴⁷⁵ Bitzka, 2018, S.27.

Für die in Tabelle 18 gegebenen Werte für die Häufigkeiten der Prozessdauern der „Kabelverlängerung“ wird die in Abb. 65 dargestellte Verteilungskurve gewählt.

Kabelverlängerung	
Häufigkeit	Prozessdauer [min]
1	55, 65, 75, 80, 85, 90, 95, 120, 130, 150
2	70, 105
3	10, 60
4	45, 50
6	20, 30, 40
7	35
8	15
10	25

Tabelle 18: Häufigkeiten Prozessdauern - Kabelverlängerung

Der im Prozessmodell verwendete Referenzwert der Prozessdauer für die „Kabelverlängerung“ von 60 Minuten würde in ca. 82 % der Fälle erreicht bzw. unterschritten werden.

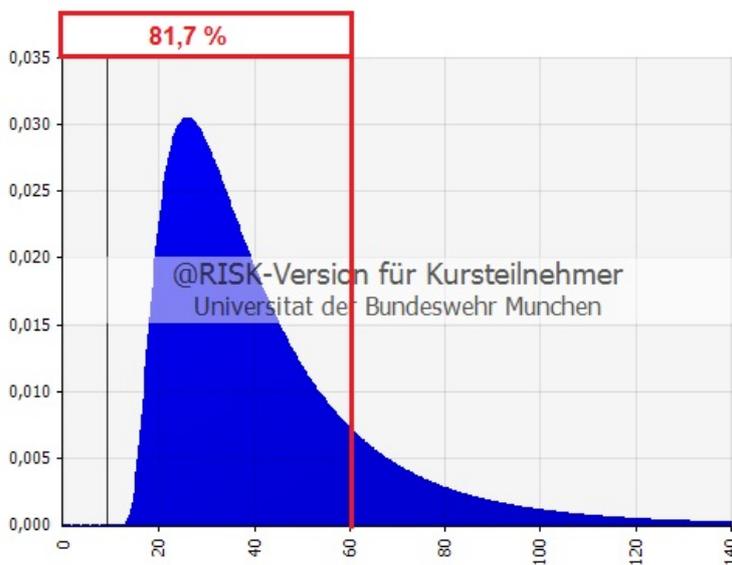


Abb. 65: Verteilungskurve, Häufigkeiten Prozessdauern - Kabelverlängerung⁴⁷⁶

⁴⁷⁶ Bitzka, 2018, S.25.

Für die in Tabelle 19 gegebenen Werte für die Häufigkeiten der Prozessdauern des Prozesses „Förderkreislauf fahren“ wird die in Abb. 66 dargestellte Verteilungskurve gewählt.

Förderkreislauf fahren	
Häufigkeit	Prozessdauer [min]
1	70
6	65
10	55, 60
32	45
33	35
35	5
37	25, 50
92	15
103	40
113	20
115	10
179	30

Tabelle 19: Häufigkeiten Prozessdauern - Förderkreislauf fahren

Der im Prozessmodell verwendete Referenzwert der Prozessdauer für den Prozess „Förderkreislauf fahren“ von 26 Minuten würde in ca. 49 % der Fälle erreicht bzw. unterschritten werden.

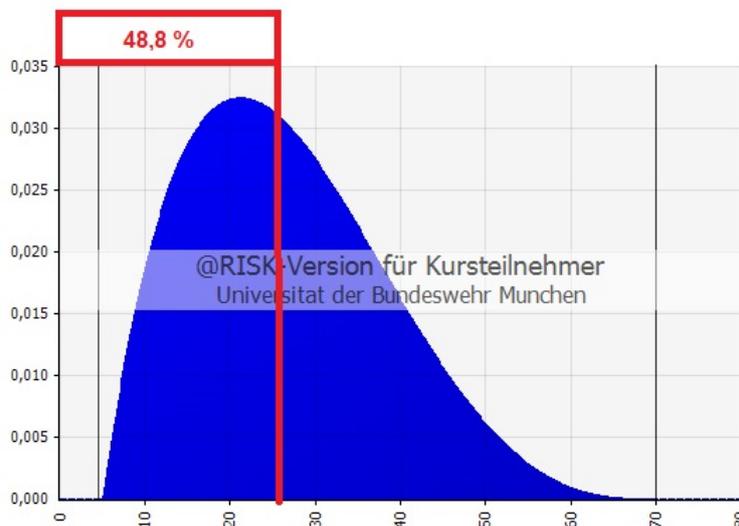


Abb. 66: Verteilungskurve, Häufigkeiten Prozessdauern - Förderkreislauf fahren⁴⁷⁷

Die Wahrscheinlichkeitsfunktionen der beiden möglichen Parallelprozesse und des Leitprozesses werden genutzt um die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer bestimmten Zielgröße zu ermitteln. Die verwendete Zielgröße spiegelt die Forderung wider, dass die Dauer eines Parallelprozesse kleiner/gleich der Dauer des Leitprozesses sein muss, also der Parallelprozess in der Zeit des Leitprozesses abgeschlossen ist.

⁴⁷⁷ Bitzka, 2018, S.28.

Hierfür werden die Werte des Parallelprozesses von den Werten des Leitprozesses abgezogen.

$$Dauer_{Leitprozess} - Dauer_{Parallelprozess} = \Delta Dauer$$

Formel 9: Berechnung der Wahrscheinlichkeit Fertigstellung des Parallelprozesses⁴⁷⁸

Hierbei werden die Verteilungsfunktionen der Prozessdauern als stochastische Eingangsgrößen verwendet. Anhand der daraus ermittelten Einzelwerte und der definierten Funktion, wird die Zielgröße (Δ Dauer) berechnet. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis eine ausreichende Stabilität der Zielgröße erreicht ist, um auf die Grundgesamtheit schließen zu können. Für jeden neuen Berechnungsdurchlauf werden neue, unabhängige Zufallszahlen und daraus folgende Stichprobenwerte aus den Verteilungsfunktionen gebildet.

Die Monte-Carlo-Simulation (1.000 Iterationen) ergibt für den Parallelprozess „Kabelverlängerung“, dass dieser mit einer Wahrscheinlichkeit von 40,7 % abgeschlossen ist (siehe Abb. 67).

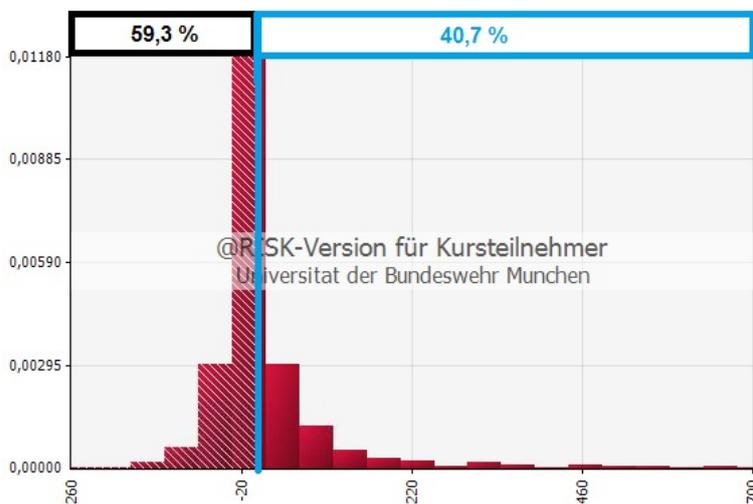


Abb. 67: Verteilung der Zielgröße - Leitprozesses und Kabelverlängerung⁴⁷⁹

Für den Parallelprozess „Förderkreislauf fahren“ ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 52,9 %, dass dieser Prozess in der Zeit der „Betriebsstörung Schneidrad“ abgeschlossen ist (Abb. 68).

Die Wahrscheinlichkeitswerte können als Kriterium für die Auswahl von Parallelprozessen herangezogen werden, indem diese in das Prozessmodell implementiert werden, wie es beispielsweise in Abb. 69 dargestellt ist. Werden die im Prozessmodell verwendeten Referenzwerte aus Abb. 63 als ausschließendes Kriterium verwendet, zeigt sich, dass für den Leitprozess „Betriebsstörung Schneidrad“ eine Dauer von 30 Minuten erwartet wird. Da für den Prozess „Kabelverlängerung“ eine Dauer von 60 Minuten erwartet wird, wird dieser nicht als Parallelprozess in Betracht gezogen. Für den Prozess „Förderkreislauf fahren“ wird eine Dauer von 10 Minuten erwartet, weshalb dieser durchaus als Parallelprozess möglich ist.

⁴⁷⁸ Bitzka, 2018, S.29

⁴⁷⁹ Ebenda, S.31 f.

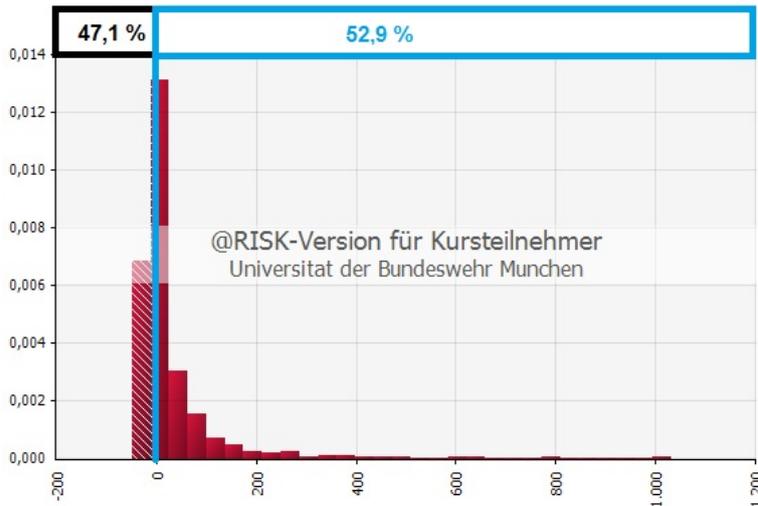


Abb. 68: Verteilung der Zielgröße - Leitprozesses und „Förderkreislauf fahren“

Wird die Auswertung der dokumentierten Prozessdaten als Kriterium für die Auswahl von Parallelprozessen herangezogen, kann diese ebenfalls als ausschließendes Kriterium verwendet werden. Je nach festgelegten Grenzwerten können z.B. nur Prozesse mit einer Wahrscheinlichkeit größer 50 % als Parallelprozess in Betracht gezogen werden. Oder die Wahrscheinlichkeitswerte dienen als Orientierungshilfe für das verantwortliche Personal. Dieses kann auf Basis der Abgeschlossenheitswahrscheinlichkeiten eine fundierte Entscheidung treffen.

Leitprozess			
Prozess wählen		Erwartete Dauer [min]	
504		Betriebsstörung Schneidrad	
		52	
Parallelprozess(e)			
Rang	Prozessnummer	Prozessname	Wahrscheinlichkeit Prozess abgeschlossen
1	302	Kabelverlängerung	40,7 %
2	301	Förderkreislauf fahren	52,9 %

Abb. 69: Beispiel alternativer Einsatz Prozessdauer - deterministische Werte

8.5.2 Filter Rohrvortrieb

Sind mehrere Prozesse unter den gegebenen Umständen parallel zum aktuellen Leitprozess möglich, erfolgt in einem zweiten Schritt die Priorisierung dieser anhand verschiedener Filter. Auf diese Weise wird dem verantwortlichen Personal der Rohrvortriebsbaustelle eine Liste aller möglichen Parallelprozesse, welche gemäß den gewählten Präferenzen geordnet ist, als Hilfestellung zur Verfügung gestellt. Diese Präferenzen beziehen sich auf die Ziele, welche mit dem Prozessmodell erreicht werden sollen. Beim Rohrvortrieb ist, wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, das Ziel, den Gesamtprozessablauf zu optimieren, indem die DWEP Vortrieb und Rohreinbau gemäß ihrer maximalen Kapazität ausgeführt werden. Für das Prozessmodell beim Rohrvortrieb wurden somit die bereits in Kapitel 7.7.2 erläuterten Filter in der folgenden Rangfolge eingesetzt:

Filter Prozessmodell Rohrvortrieb:

- | | |
|------------------|--------------|
| 1. Fälligkeit | (= Filter 1) |
| 2. Häufigkeit | (= Filter 2) |
| 3. Dauer | (= Filter 3) |
| 4. Prozessnummer | (= Filter 4) |

Die Priorisierung erfolgt mit dem Prozessmodell automatisch. Hierbei wird ein Abgleich mit dem aktuellen Zustand des Vortriebs bzgl. des aktuellen Ortes des Vortriebs [Tunnelmeter] und der Dauer des Vortriebs [Minuten] (= produktive Arbeitszeit) sowie der dokumentierten Daten, der Prozesshäufigkeit und des letztmaligen Auftretens der Prozesse hinsichtlich des Ortes und der Zeit ihrer Durchführung durchgeführt. Die Filter werden nach ihrer Anordnung einer nach dem anderen durchlaufen. Auf diese Weise werden die Parallelprozesse nach den vorher definierten Präferenzen angeordnet. Die höchste Präferenz hat die Fälligkeit der Prozesse (= Filter 1). Nach diesem Filter werden die möglichen Prozesse als erstes geordnet. Befinden sich nach dem ersten Filter mehrere Prozesse auf einem Rang werden diese nach ihrer Häufigkeit (= Filter 2) geordnet. Bei weiterhin gleichen Stufen, werden die Prozesse nach der erwarteten Dauer (= Filter 3) sortiert. Ist weiterhin keine eindeutige Rangfolge ohne gleiche Platzierung vorhanden, erfolgt die Sortierung nach den Prozessnummern (= Filter 4). Es werden im Folgenden die beim Rohrvortrieb verwendeten Filter kurz erneut mit ihrem Bezug zum Rohrvortrieb erläutert.

Filter Fälligkeit

Die IWEP werden jeweils nach einer bestimmten Dauer bzw. nach einer bestimmten Vortriebslänge notwendig⁴⁸⁰. Sie sind in regelmäßiger Wiederholung auszuführen, haben also eine zyklische Fälligkeit. Wie diese Fälligkeit (Späteste Ausführung) bzgl. der Tunnellänge ermittelt wird, wurde im Kapitel 8.2 dargestellt. Die Späteste Ausführung und die Fälligkeit bzgl. der Dauer werden, wie folgend dargestellt, ermittelt. Hierbei ist zu beachten, dass der Werte der Fälligkeit [%] die Systemreserve bis zur nächsten Ausführung darstellt. Je geringer diese Reserve ist, desto höher wird die normierte Fälligkeit (siehe Skala Kapitel 8.2).

⁴⁸⁰ Auch die DWEP erhalten eine Fälligkeit. Sollte also ein DWEP parallel zu einem IWEP oder NWEP möglich sein und selbst nicht auf dem Kritischen Weg, steht auch dieser zur Auswahl. Aufgrund der kurzzyklischen Wiederholung der DWEP, haben diese stets eine hohe Fälligkeit und werden somit in der Rangliste weit oben stehen. Ebenso verhält es sich mit den IWEP im Vergleich zu den NWEP, da die IWEP deutlich häufiger auftreten, als die NWEP.

$$SA_T = SF - VD_{pt} + LD \quad [min]$$

Formel 10: Berechnung SA [min] in Abhängigkeit der Vortriebsdauer

- SA_T = Spätester Ausführungsbeginn [min]
- SF = Dauer bis Wiederholung / Späteste erneute Fälligkeit [min]
- VD_{pt} = Produktive Vortriebsdauer im Zeitraum t [min]⁴⁸¹
- LD = Zeitpunkt der letzten Durchführung [min]

Die Ermittlung der Fälligkeit erfolgt nach Formel 8 und lässt sich nach der in Abb. 54 dargestellt Normskala einordnen.

$$F = SA_T * \frac{100}{SF} \quad [%]$$

- F = Fälligkeit [%]
- SA_T = Spätester Ausführungsbeginn [min]
- SF = Dauer bis Wiederholung / Späteste erneute Fälligkeit [min]

Die für die Ermittlung der Fälligkeiten und Normierung notwendigen aktuellen Daten zum Vortrieb und die prozessspezifischen Informationen sind dabei die folgenden. Abb. 70 zeigt ein Beispiel für die Ermittlung der vergleichbaren Fälligkeitswerte unterschiedlicher Prozesse.

Die aktuellen (fortlaufenden) Informationen sind:

- Aktueller Ort
(Tunnelmeter an dem sich der Vortrieb befindet; in [Tunnelmeter])
- Arbeitsdauer
(abhängig von Datum, Uhrzeit, tägliche Arbeitszeit, Stillstandzeiten; in [Minuten])

Die prozessspezifischen Informationen sind:

- Zyklische Fälligkeit nach Ort oder Zeit (alle x Meter, alle y Minuten)
- Letzte Durchführung nach Ort oder Zeit (bei Tunnelmeter x, in Minute y)

Aktueller Ort [Tunnelmeter]		Arbeitsdauer [Minuten]							
1250 m		76.155 min							
Rang	Prozessnummer	Prozessname	Zyklische Fälligkeit - Ort	Zyklische Fälligkeit - Zeit	Letzte Durchführung - Ort	Letzte Durchführung - Zeit	Fälligkeit - Ort	Fälligkeit - Zeit	Fälligkeit
1	306	Auffüllen Hydrauliköl	50	0	1202	0	1252	0	10
2	301	Förderkreislauf fahren	4	0	1248	0	1252	0	9
3	324	Rohr Ausstattung	0	60	0	76.104	0	76.164	8
4	302	Kabelverlängerung TBM	50	0	1208	0	1258	0	7
5	506	Betr.-störung Schneidr. hyd.	0	1800	0	74.985	0	77.270	6
6	303	Kabelverlängerung Pumpe	50	0	1222	0	1272	0	5
7	504	Betr.-störung Schneidr. el.	0	1800	0	75.435	0	77.235	4
8	304	Kontrollvermessung	80	0	1222	0	1290	0	3
9	505	Betr.-störung Schneidr. mech.	0	1800	0	75.600	0	77.400	2
10	314	Entleeren Förderkreislauf	0	900	0	75.345	0	76.245	1
11	315	Auffüllen Förderkreislauf	0	900	0	75.375	0	76.275	0

Abb. 70: Beispiel Ermittlung der normierten Fälligkeiten verschiedener Prozesse

⁴⁸¹ Siehe Berechnung Formel 11.

Beispiel

Der Förderkreislauf zur Reinigung ist spätestens alle 15 Stunden (900 Minuten) durchzuspülen („zu fahren“). Das letzte Mal wurde der Prozess bei Minute 75.345 (= LD) durchgeführt. Die aktuelle Produktive Vortriebsdauer VD_{pt} liegt bei Minute 76.155. Der späteste Ausführungsbeginn (SA) berechnet sich folgendermaßen:

$$\begin{aligned}
 SA_T &= SF - VD_{pt} + LD \\
 &= 900 \text{ min} - 76.155 \text{ min} + 75.345 \text{ min} \\
 &= 90 \text{ min}
 \end{aligned}$$

In 90 Minuten, das entspricht Vortriebsminute 76.245, wird das Fahren des Förderkreislaufes spätestens erneut fällig. Es ergibt sich anhand von Formel 8 eine Fälligkeit von 10 % und somit eine (normierte) Fälligkeit von 9.

Werden die NWEP über einen längeren Zeitraum dokumentiert, sollten sich auch für das Auftreten dieser Prozesse relativ regelmäßige Zeit- bzw. Ortsintervalle ergeben. Anhand dieser lassen sich zukünftige Störungen abschätzen, indem den NWEP ebenfalls eine zyklische Fälligkeit zugeordnet wird. Um weitreichende Auswirkungen zu vermeiden, können dann Wartungen / Inspektionen / Kontrollen für diese NWEP fällig werden. Somit werden die NWEP **begrifflich zu IWEP**, da anhand dieser Informationen die präventiven Kontrollen indirekt werterzeugend eingesetzt werden. Die Information, dass in näherer Zukunft der Austausch eines Maschinenteils fällig wird, kann hierbei in die Planung miteingehen und schwerwiegendere Störungen durch unvorhergesehene Wartezeiten (bspw. aufgrund langer Lieferzeiten von Ersatzteilen) verhindern. Informationen bzgl. der Verschleißteile werden i.d.R. von den Herstellern geliefert, die Erfahrungsdaten aus ähnlichen Bauprojekten (bspw. bzgl. der Bodenart) können diese jedoch verfeinern bzw. projektspezifischer darstellen. Festzuhalten ist, dass für diesen Zweck eine große Anzahl an dokumentierten Prozessen notwendig ist und auch die Aussagekraft der Informationen überprüft werden muss.

Filter Häufigkeit

Die Implementierung eines kontinuierlichen Verbesserungsprozesses bzw. Lernprozesses ist insbesondere bei Bauabläufen wie dem Rohrvortrieb, bei welchen sich die Prozesse innerhalb relativ kurzer Zeit wiederholen, durch die Dokumentation der Häufigkeit der Prozesse möglich. Hierbei ergeben sich absolute Kennzahlen, anhand welcher sich innerhalb eines Projektes beispielsweise ermitteln lässt, für welche Störungen die wahre Ursache (noch) nicht erkannt oder behoben wurde. Zudem können sich Richtwerte (z.B. bzgl. der Maschinenanfälligkeit bei bestimmten Böden) ergeben, welche bei zukünftigen Projekten genutzt werden können.

Als zweiter Filter lässt die Häufigkeit einen Vergleich und die Erstellung einer detaillierteren Rangfolge der Prozesse zu. Durch die Erbringung häufig auftretender Prozesse (bspw. präventive Kontrolle ausfallanfälliger Maschinen) können schwerwiegendere Probleme verhindert werden bzw. der mögliche Prozessausfall (Ausfall der Vortriebsmaschine) in der Planung berücksichtigt werden (bspw. durch die frühzeitige Bestellung von Ersatzteilen).

Mit dem Prozessmodell lässt sich auch die Häufigkeit der DWEP dokumentieren, anhand welcher sich Verbesserungen und die Zielerreichung messen lassen. Da die DWEP und

die IWEP aufgrund ihrer relativ regelmäßigen Wiederholungen am häufigsten auftreten, werden sie bei der Rangfolgenbildung stets höher eingestuft, was der Forderung der Priorisierung des Leitprozesses entspricht.

Filter Prozessdauer

Für den dritten Filter wurde die Prozessdauer in der Form gewählt, dass sich die möglichen Parallelprozesse nach der zu erwartenden Prozessdauer steigend anordnen (geringste Dauer erhält höchsten Rang). Durch diese Sortierung wird sichergestellt, dass (bisher, nach den ersten beiden Filtern) bei Gleichrangigkeit die Prozesse zuerst erbracht werden, die kürzer sind. Auf diese Weise wird die Wahrscheinlichkeit verringert, dass die Ausführung des Parallelprozesses nicht länger als der eigentliche Leitprozess dauert. Dies würde wie im Kriterium 3 beschrieben, im Gegensatz zur Zielforderung der Priorisierung des Leitprozesses stehen. Mit diesem Filter wird die Wahrscheinlichkeit einen zu langen Parallelprozess auszuwählen reduziert, was aufgrund der im Rohrvortrieb relativ kurzen Prozesszeiten am sinnvollsten erscheint.

Filter Prozessnummer

Für den Fall, dass nach Durchlauf der ersten drei Filter weiterhin mehrere Prozesse denselben Rang haben, werden diese nach ihrer Prozessnummer (ansteigend) sortiert. Jeder Prozess hat eine individuelle Prozessnummer. Die hinterlegten Prozesse im Prozessmodell beim Rohrvortrieb sind so angelegt, dass die DWEP die niedrigsten Nummern haben, gefolgt von den IWEP und den NWEP. Durch die ansteigende Sortierung erhalten die DWEP und IWEP einen höheren Rang als die NWEP. Dies entspricht der Forderung nach der Priorisierung des Leitprozesses. Wird ein NWEP als Parallelprozess ausgewählt, handelt es sich bei ihm um eine präventive („nur“ mutmaßlich notwendige) Maßnahme, also begrifflich um einen IWEP, mit dem Ziel der zukünftigen Kapazitätsoptimierung der DWEP. Die im Prozessmodell verwendeten übergeordneten Prozessnummern sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Prozessnummern	Prozessgruppen
100	Vortrieb
200	Rohreinbau
300	Systembedingte Ausfallzeiten
400	Wartezeiten
500	Betriebsstörung TBM
600	Betriebsstörung Tunnel / Schacht
700	Betriebsstörung BE / Logistik
800	Betriebsstörung Separieranlage
900	Sonstige Störungen

Tabelle 20: Prozessnummern Prozessmodell Rohrvortrieb

Ablauf Filterabfrage

Die Filterabfrage läuft automatisch nach den folgenden Punkten und wie in Abb. 71 dargestellt ab.

1. Nachdem die Prozesse, die Kriterium 1 erfüllen und nach Kriterium 2 und 3 farblich markiert wurden, ermittelt sind, werden diese anhand der vier ausgewählten Filter priorisiert, bis eine eindeutige Rangfolge vorhanden ist. Hierzu wird ein Filter nach dem anderen, nach der festgelegten Reihenfolge „durchlaufen“.
2. Als erstes werden alle möglichen Prozesse bzgl. ihrer Fälligkeit (= Filter 1) angeordnet.
3. Haben alle Prozesse einen unterschiedlichen Rang, kann die Prozessrangfolge angezeigt werden.
4. Haben zwei oder mehr Prozesse den gleichen Rang, werden diese bzgl. ihrer Häufigkeit (= Filter 2) geordnet.
5. Haben alle Prozesse einen unterschiedlichen Rang, kann die Prozessrangfolge angezeigt werden.
6. Haben zwei oder mehr Prozesse den gleichen Rang, werden diese bzgl. ihrer durchschnittliche Prozessdauer (= Filter 3) geordnet.
7. Haben alle Prozesse einen unterschiedlichen Rang, kann die Prozessrangfolge angezeigt werden.
8. Haben zwei oder mehr Prozesse den gleichen Rang, werden diese nach den Prozessnummern (= Filter 4) geordnet und die Prozessrangfolge wird angezeigt.

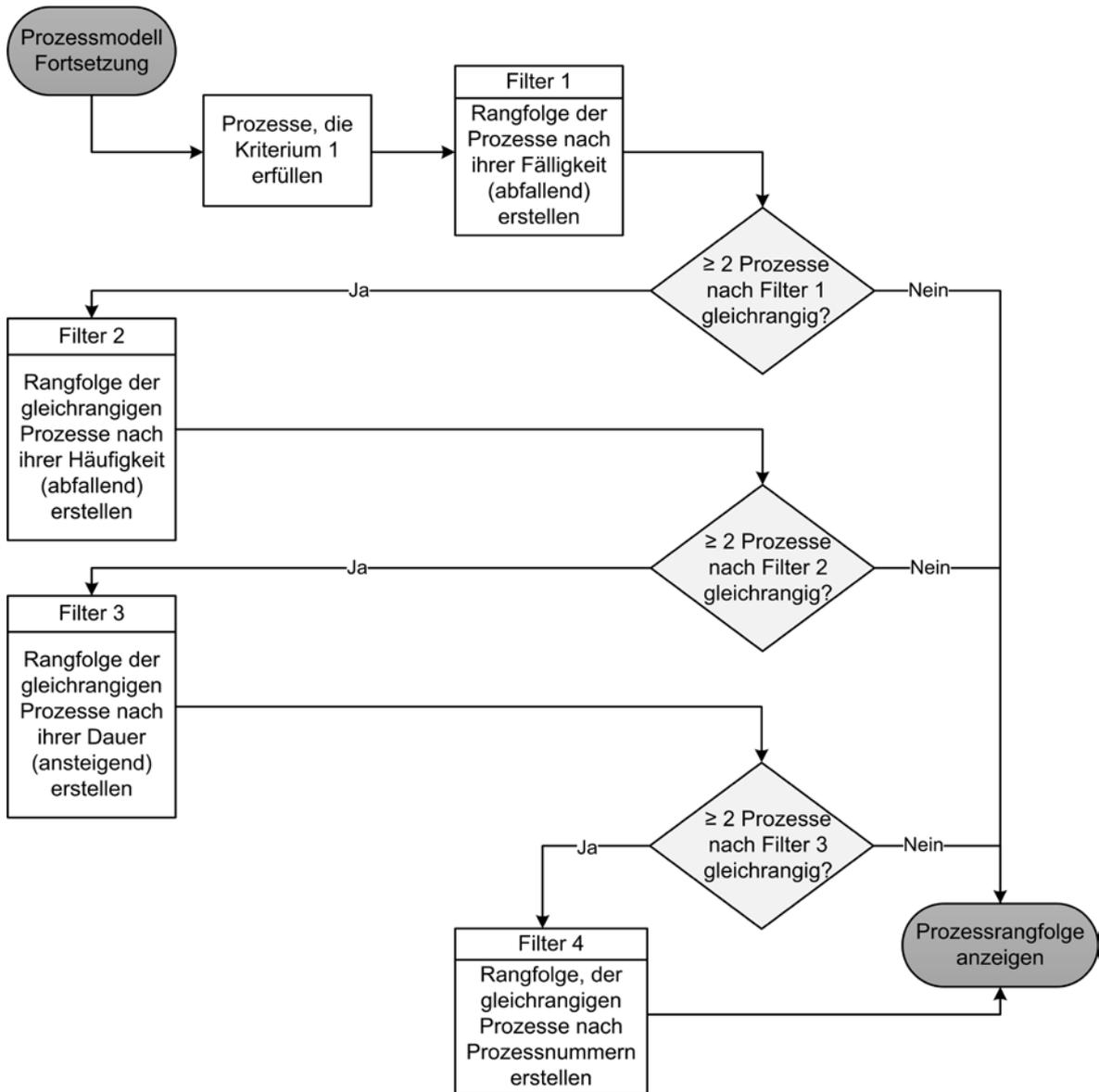


Abb. 71: Ablaufschema Anwendung der Filter zur Rangfolgenbildung

8.6 Aufbau Prozessmodell

Das Prozessmodell wurde gemäß den Beschreibungen der Modellentwicklung in Kapitel 4 für eine praktische und intuitive Anwendbarkeit ausgearbeitet. Um die Umsetzbarkeit und Praxistauglichkeit zu untersuchen, wurde das Modell testweise für ein Rohrvortriebsprojekt des Ingenieurbauunternehmens *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG (W&F)* eingesetzt und mit diesem validiert. In den folgenden Abschnitten werden der Aufbau und die Elemente dieser Version des Prozessmodells sowie der Ablauf seiner Nutzung erläutert. Das Prozessmodell wurde für den Rohrvortrieb konzipiert, jedoch ist eine Adaption auf andere Bauverfahren des Tunnelbaus (wie im Kapitel 7 gezeigt wurde) wie auch auf andere Bereiche des Bauwesens möglich. Eine Anpassung der bekannten Prozesse des jeweiligen Bauverfahrens, deren Eingangsparameter und Abhängigkeiten sind hierfür notwendig. Der Aufwand für ähnliche, vergleichbare Projekte (Randbedingungen und Verfahren nahezu identisch) sollte sich auf ein paar wenige individuelle Anpassungen (z.B. bzgl. der Ressourcen) beschränken, welche im Rahmen der Projektvorbereitung aufgrund der Einzigartigkeit jedes Projektes stets zu erbringen sind.

8.6.1 Modellierung Prozessmodell

Die verwendete Version des Prozessmodells wurde so gestaltet, dass Anpassungen der Programmierung und der Modelloberfläche während der Testphase möglichst direkt und einfach durchführbar sind.

Bei der Gestaltung wurde auf eine systematische, effiziente und intuitiv nutzbare Oberfläche Wert gelegt. Die Programmierung erlaubt es den Ablauf des Prozessmodells nach Eingabe der notwendigen projektspezifischen Daten und der Leitprozessauswahl automatisch ablaufen zu lassen. Der Anwender wird in die Lage versetzt, mithilfe des Prozessmodells in kürzester Zeit eine Liste sinnvoller Prozesse auszugeben, welche während eines Stillstandes unter den gegebenen Randbedingungen möglich und sinnvoll sind. Das Modell soll als ein Hilfswerkzeug fungieren und die Ablaufoptimierung und Dokumentation für das verantwortliche Personal vereinfachen, damit dieses sich auf ihre wesentlichen Aufgaben (proaktive Steuerung⁴⁸²) konzentrieren kann.

Das Prozessmodell wird auf fünf Seiten dargestellt. In diesen können neue Daten eingegeben, Berechnungen ausgeführt oder bereits vorhandene Daten abgerufen werden. Die erste Seite wird als „Startseite“ bezeichnet. Im Normalfall ist diese die einzige Seite, welche vom Anwender genutzt wird. Die zweite Seite enthält alle bereits bekannten, in der Vergangenheit aufgetretenen bzw. zu erwartende Prozesse einschließlich jeglicher bekannter Informationen. Die dritte Seite dient zur Anlage neu aufgetretener / noch nicht im Prozessmodell erfasster Prozesse. Die vierte und fünfte Seite dienen zur Ermittlung der möglichen Parallelprozesse im Zeitraum eines Stillstandes oder optional auch während eines DWEP (Vortriebs- oder Rohreinbauprozess).

Startseite	Prozesse	Prozessanlage	Prozesse Clean	Prozesse Filter
------------	----------	---------------	----------------	-----------------

Abb. 72: Seiten Prozessmodell

⁴⁸² Vgl. Binninger und Wolfbeiß, 2018, S.164.

8.6.2 Seite „Startseite“

Die „Startseite“ stellt die Anwendungsoberfläche für den Nutzer dar. Im Normalfall ist dies die einzige Seite, welche vom Nutzer verwendet wird. Auf dieser hat der Nutzer die Möglichkeit, das Modell individuell auf sein Projekt anzupassen. Ausgenommen sind bei dieser Anpassung die individuelle Eingabe von Prozessen, die Abhängigkeiten und Parameter der Prozesse. Diese Anpassungen sind nur auf der Seite „Prozesse“ (siehe Abs. 8.6.3) möglich. Auf der „Startseite“ werden allgemeine Angaben eingegeben. Verschiedene Angaben (Tunnelfortschritt, Arbeitsdauer) laufen nach der Initialisierung fortlaufend weiter oder müssen manuell eingegeben bzw. angepasst werden. Aus einer Auswahlliste können bereits bekannte Prozesse als Leitprozess ausgewählt werden. Um die Ausgabe von möglichen Parallelprozessen zu erweitern bzw. einzuschränken, können verschiedene Angaben (Akzeptanz zu geringer Ressourcenanzahl oder zu langer Prozessdauern) individuell angepasst werden. Außerdem kann auf der Startseite das Prozessmodell gestartet und dann die möglichen Parallelprozesse mit einigen zusätzlichen Informationen in priorisierter Reihenfolge dargestellt sowie über einen Button dokumentiert werden. Im Folgenden werden die auf dieser Seite einzugebenden und anpassbar Angaben näher erläutert. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel für die Startseite.

Datum		Haltung		Ressourcen							
13.06.2017		Haltung Holstenwall		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra
				1	2	1	2	1	1	1	0

Leitprozess		Erwartete Dauer [min]		Tunnelfortschritt [m]	Arbeitsdauer [min]	Parallelprozess
605	Betriebsstörung Widerlager	30		435	43.155	Suche starten

Ressourcenakzeptanz		Prozess
0,5	+/- 0	dokumentieren

Parallelprozess(e)		Ressourcen								E. Dauer [min]	Fälligkeit	Häufigkeit	
Rang	P.-Nr.	Prozessname	KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra			
1	306	Auffüllen Hydrauliköl	0,5	0	0	0	1	0	0	0	15	10	1
2	301	Förderkreislauf fahren	0,5	0	1	0	1	1	0	0	10	9	8
3	303	Kabelverlängerung Pumpe	1	1	1	1	1	0	1	0	60	8	8
4	302	Kabelverlängerung TBM	1	1	1	1	1	0	1	0	60	7	8
5	304	Kontrollvermessung	0,5	0	0	0	0	0	0	1	180	6	5
6	324	Rohr Ausstattung	1	1	0	0	0	0	0	0	30	5	216
7	504	Betriebsstörung Schneidrad - elektrisch	0,5	0	1	1	1	0	0	0	30	4	0
8	506	Betriebsstörung Schneidrad - mechanisch	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	3	0
9	505	Betriebsstörung Schneidrad - hydraulisch	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	2	0
10	314	Entleeren Förderkreislauf	0	0	0	0	0,5	1	0	0	30	1	1
11	315	Auffüllen Förderkreislauf	0	0	0	0	0,5	1	0	0	30	0	1

Abb. 73: Beispiel Startseite Prozessmodell

Allgemeine Angaben

Die allgemeinen Angaben umfassen alle Informationen, die sich auf das spezifische Projekt beziehen. Hierzu zählen der Projektname (Bauabschnitt / Haltung), das Datum und die verfügbaren Ressourcen. Das Datum stellt sich automatisch auf den jeweiligen Tag ein, kann jedoch manuell geändert werden. Die Ressourcen beziehen sich im Prozessmodell, da bei einem Rohrvortriebsprojekt nur der Kran, die Vortriebsmaschine und die Separationsanlage als mögliche kritische Maschinenressourcen vorhanden sind und diese durch die Arbeitskräfte Kran-, Separationsanlagen- und Schichtfahrer bereits berücksichtigt werden. Zu den Ressourcen zählen zudem Elektriker, Mechaniker, Schichtführer und Schlosser. Die Ressource „Extra“ wird für Externe oder speziell notwendige Nachunternehmer vorgehalten, wie beispielsweise externe Vermesser, Kontrolleure oder Gutachter.

Datum	Heute	Haltung	Ressourcen							
01.06.2018		Haltung Holstenwall	KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra
			1	2	1	2	1	1	1	0

Abb. 74: Startseite - Allgemeine Angaben⁴⁸³

Angaben fortlaufend

Zu den fortlaufenden Angaben zählen der Tunnelfortschritt (Angabe in Tunnelmetern [m]) und die Produktive Vortriebsdauer VD_{pt} (Angabe in Minuten [min]). Die VD_{pt} wird aus dem eingegebenen Datum des Projekt- / Vortriebbeginns, des aktuellen Zeitpunkts (= Datum und Uhrzeit), der täglichen Arbeitszeit, den Stillstandzeiten und Feiertagen ermittelt. Der Tunnelfortschritt ist manuell einzugeben, jedoch sollte dieser zukünftig über eine Verknüpfung des Systems mit der Maschinenanlage automatisch erfasst werden. Die genaue Erfassung der Vortriebsdauer und des Tunnelfortschritts sind für eine exakte Ermittlung von sinnvollen Parallelprozessen notwendig. Die Produktive Vortriebsdauer kann nach den folgenden Formeln berechnet werden und Abb. 75 zeigt ein Beispiel für die Ermittlung.

$$VD_{pt} = (AT_t - 1) * Ah * 60 - SZ_t + VD_a$$

Formel 11: Berechnung der Produktiven Vortriebsdauer

VD_{pt}	=	Produktive Vortriebsdauer im Zeitraum t [min]
t	=	Zeitraum Auswertung (Projektbeginn bis aktuell) [min]
SZ_t	=	Summe Stillstandzeiten [min]
T_t	=	Anzahl Tage im Zeitraum t [T]
FT_t	=	Anzahl Feiertage im Zeitraum t [T]
AT_w	=	Anzahl Arbeitstage pro Woche [T]
AT_t	=	Arbeitstage im Zeitraum t [T]
Ah	=	tägliche Arbeitszeit [h/T]
VD_a	=	(heutige) aktuelle Vortriebsdauer [min]

Mit:

$$AT_t = T_t * \left(\frac{AT_w}{7}\right) - FT_t$$

Formel 12: Berechnung der Arbeitstage im Zeitraum t

⁴⁸³ Für die Arbeit optimierter Screenshot des Prozessmodells.

Stillstandzeiten			Feiertage	
Datum	Dauer [min]		Datum	
15.03.2018	10		30.03.2018	
16.03.2018	15		02.04.2018	
28.03.2018	20		01.05.2018	
11.04.2018	10		10.05.2018	
26.04.2018	20		21.05.2018	
16.05.2018	25		31.05.2018	
Summe	100		Summe	6
Startdatum	Datum	Heute	Arbeitsbeginn	Uhrzeit (Jetzt)
14.03.2018	27.06.2018		07:00	10:45
Arbeitstage (6 Tage-Woche) [AT]			Arbeitszeit Heute [min]	
88			225	
Mögliche Arbeitszeit gesamt (Ende AT) [min]			Produktive Vortriebsdauer [min]	
84.480			83.645	

Abb. 75: Beispiel für die Ermittlung der Produktiven Vortriebsdauer⁴⁸⁴

Prozessauswahl und Kriterien-Akzeptanzbereich

Ist der Leitprozess (= Ursache für Stillstand⁴⁸⁵) identifiziert und bereits bekannt (= in der Vergangenheit aufgetretener, dokumentierter und mit Informationen hinterlegter Prozess), kann dieser aus der Auswahlliste ausgewählt werden. Dies geschieht entweder über den Namen (bzw. Beschreibung des Prozesses, z.B.: „Betriebsstörung Stromversorgung - mechanisch“) oder über die Prozessnummer. Jedem in der Prozessliste aufgeführte Prozess ist eine spezifische Prozessnummer zugeordnet (siehe Abs. 8.6.3).

Bevor das Prozessmodell gestartet wird und dieses mögliche Parallelprozesse ausgibt, können bzgl. der Ressourcen und der Prozessdauer individuelle Angaben gemacht werden, um Prozesse bei der Abfrage der Kriterien nicht zu radikal auszuschließen. Für die Ressourcen kann bspw. eine Arbeitskraft weniger akzeptiert werden, der Bauleiter oder die verantwortliche Person (z.B. Polier) kann dann selber entscheiden, ob der Prozess mit seinem zur Verfügung stehenden Personal möglich ist. Für die durchschnittliche Prozessdauer kann ebenfalls ein Bereich gewählt werden, für den mögliche (streng gesehen: zu lange) Parallelprozesse akzeptiert werden. Dies ist sinnvoll, wenn die Dauer der Störung nicht exakt absehbar ist. Beispielsweise können so auch Prozesse bei der Ausgabe akzeptiert werden, welche ein paar Minuten länger als die erwartete Prozessdauer der Störung dauern. Auch die manuelle Eingabe der Dauer der Störung ist möglich, sollte der Bauleiter bzw. das verantwortliche Personal mit seiner Erfahrung erkennen, dass eine Störung aufgrund ihrer Schwere deutlich länger als erwartet ausfallen wird. In der Version des Prozessmodells, die im Projekt verwendet wurde, werden die Prozesse, welche die Kriterien 2 und 3 nicht erfüllen, nicht direkt ausgeschlossen, sondern in der Ergebnisausgabe farblich markiert. Bevor der Prozess dokumentiert wird, ist die Angabe bzgl. der tatsächlichen Prozessdauer einzutragen. Sobald der Button „Prozess dokumentieren“ gedrückt wird, erscheint eine Abfrage, ob alle Angaben zum Leitprozess und Parallelprozess aktualisiert wurden (siehe „Dokumentation Prozesse“).

⁴⁸⁴ Im Prozessmodell wurde eine tägliche Arbeitsdauer von 16 Stunden und eine 6 Tage-Woche verwendet. Der dargestellte Zeitraum, die Stillstandzeiten und Feiertage sind exemplarisch und nicht dem realen Projekt entnommen. Die Stillstandzeiten und Feiertage sind in im Prozessmodell einzupflegen.

⁴⁸⁵ Das Prozessmodell kann auch für die DWEP genutzt und diese als Leitprozess ausgewählt werden. Dieser Fall sollte jedoch durch die reguläre Planung abgedeckt sein. Zur Dokumentation aber sinnvoll.

Ausgabe Parallelprozesse und Interpretation

Die möglichen Parallelprozesse werden ausgegeben, indem das Prozessmodell gestartet wird. Hierfür ist zuerst der Leitprozess aus der Prozessliste zu wählen und die oben beschriebenen Daten einzugeben. Die Ausgabe erfolgt gemäß den definierten Filtern in einer eindeutigen Rangfolge. Zusätzlich werden für alle ausgegebenen Prozesse die notwendigen Ressourcen dargestellt. In der verwendeten Version des Prozessmodells werden Prozesse mit zu hohem Ressourcenbedarf akzeptiert, jedoch werden diese in roter Schrift dargestellt. Entspricht der Ressourcenbedarf mindestens dem zur Verfügung stehenden Kontingent, dann werden diese in grüner Schrift dargestellt (siehe hierzu das Beispiel in Abb. 61).

Ebenso wird die Prozessdauer „Zeit“ farblich dargestellt. Ist die Prozessdauer zu lang, wird diese in schwarzer Schrift auf rotem Grund dargestellt. Entspricht die Prozessdauer exakt der erwarteten Prozessdauer des Leitprozesses, wird diese in roter Schrift auf grünem Grund dargestellt. Ist die Prozessdauer geringer als die erwartete Prozessdauer des Leitprozesses, wird diese in schwarzer Schrift auf grünem Grund dargestellt.

Dokumentation Prozesse

Damit die Informationen (Ressourcen; Dauer; letzter Ort des Auftretens; letzter Zeitpunkt des Auftretens; und aus der Dokumentation folgend die Häufigkeit) des Leitprozesses (und falls möglich, des Parallelprozesses) zukünftig (kurzfristig, im Projekt; langfristig, in weiteren Projekten) verwendet werden können, müssen diese dokumentiert werden. Durch die Betätigung des Buttons „Prozess dokumentieren“ werden die Informationen in das Tabellenblatt „Prozesse“ übertragen. Bevor dies möglich ist, wird eine Abfrage angezeigt (= Pop-up Fenster; siehe Abb. 76), mit welchem sichergestellt wird, dass die Angaben bzgl. des Leitprozesses und des ausgewählten Parallelprozesses aktualisiert wurden und korrekt sind. Durch die Bestätigung werden die Daten bzgl. des letzten Ortes und des letzten Zeitpunkts der Prozessausführung aktualisiert. Die hinterlegten Angaben zu den benötigten Ressourcen und der Prozessdauer werden nur abgeändert, sollten sie manuell angepasst werden. Die Prozessdauer fließt dann in die für den Prozess hinterlegte Dauer mit ein. Durch die Dokumentation erhöht sich die Zahl der Häufigkeit für den Prozess um eins, auch diese Information wird in den hinterlegten Daten aktualisiert und kann im weiteren Projektverlauf genutzt werden.

Leitprozess und Parallelprozess dokumentieren

Leitprozess

Prozess- Nummer	Prozess- Bezeichnung	Ressourcen								Prozess- Dauer [min]	Ort [m]	Datum & Uhrzeit - Ende
		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra			
▼	▼											

Parallelprozess

Prozess- Nummer	Prozess- Bezeichnung	Ressourcen								Prozess- Dauer [min]	Ort [m]	Datum & Uhrzeit - Ende
		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra			
▼	▼											

Angaben OK -
dokumentieren

Abb. 76: Pop-up Fenster - Abfrage Dokumentation

8.6.3 Seite „Prozesse“

Prozessgruppen und Prozessnummern

Die Seite „Prozesse“ wird i.d.R. nicht vom Anwender gebraucht, sie ist nur für das Einrichten und Pflegen von Bedeutung. Auf dieser sind alle bereits bekannten, in der Vergangenheit aufgetretenen Prozesse aufgelistet. Diese sind in Prozessgruppen unterteilt, aus welchen sich die Prozessnummern ergeben. Die übergeordneten Prozessgruppen sind:

100.	Vortriebsprozesse	(= DWEP)
200.	Rohreinbauprozesse	(= DWEP)
300.	Systembedingte Ausfallzeit	(= IWEP)
400.	Wartezeiten	(= NWEPE)
500.	Betriebsstörung / Reparatur TBM / SM	(= NWEPE)
600.	Betriebsstörung / Reparatur Tunnel / Schacht	(= NWEPE)
700.	Betriebsstörung / Reparatur BE / Logistik	(= NWEPE)
800.	Betriebsstörung / Reparatur Separieranlage	(= NWEPE)
900.	Sonstiges	(= NWEPE)

Prozessdaten

Für jeden Prozess sind Kennzahlen hinterlegt, anhand derer die Kriterien und Filter abgefragt werden können. Diese umfassen die folgenden Daten:

- Prozessnummer
- Technische Möglichkeit zur parallelen Ausführung (siehe Tabelle 21),
- notwendige Ressourcen,
- Prozessdauer,
- zyklische Fälligkeit nach Ort oder Zeit,
- letzte Durchführung nach Ort und Zeit,
- Häufigkeit
- und Anzahl der direkten Nachfolgeprozesse.

Prozessnummer	Prozessname	Technisch mögliche Parallelprozesse
...
302	Kabelverlängerung TBM	207, 305, 306, 309, 314, 315, 905, 908
...
304	Kontrollvermessung	207, 302, 303, 305, 306, 309, 311, 314, 315, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 905, 907, 908
...
306	Auffüllen Hydrauliköl	201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 302, 303, 304, 307, 308, 309, 310, 311, 314, 315, 316, 317, 318, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 905, 907, 908

Tabelle 21: Beispiel für technisch mögliche Parallelprozesse zu ausgewählten IWEP

Prozessfälligkeit

Für jeden Prozess wird eine Fälligkeit ermittelt, damit die möglichen Parallelprozesse bzgl. ihrer Dringlichkeit geordnet werden können. Wie bereits im Abs. 8.5.2 und 7.7.2 erläutert, gibt es hierbei Unterschiede zwischen den Prozessen. Einige sind nach einer bestimmten Länge Tunnelmeter (oder z.B. Abraum) (= örtliche Fälligkeit), andere nach einer bestimmten Arbeitsdauer (= zeitliche Fälligkeit) zu erbringen. Die Fälligkeit lässt sich anhand des jeweiligen Standes des Projektes ermitteln (Tunnelmeter; Datum, Uhrzeit, Arbeitszeit, Stillstandzeiten). Damit ein Vergleich dieser Fälligkeiten möglich ist, werden beide auf eine einheitliche Skala normiert.

Dies geschieht für die DWEP (immer höchste Fälligkeit), die IWEP und die NWEF. Die Formel zur Berechnung und die Anwendung der Skala sind in Tabelle 6 und Abb. 54 dargestellt.

8.6.4 Seite „Prozessanlage“

Tritt eine Störung zum ersten Mal auf bzw. ist der zur Behebung dieser notwendige Störprozess noch nicht in der Prozessliste aufgeführt, kann dieser auf der Seite „Prozessanlage“ neu angelegt werden. Hierfür ist zuerst zu entscheiden, unter welche übergeordnete Prozessgruppe der Prozess fällt. Daran orientiert ist dem Prozess eine fortlaufende Nummer dieser Kategorie zuzuordnen. Beispielsweise wird ein neuer, den Schacht „600 - Betriebsstörung / Reparatur Tunnel / Schacht“ betreffender Störprozess, eine fortlaufende 600ter Nummer (z.B. 628) erhalten.

Zu ergänzen sind weitere Angaben bzgl. der Ressourcen, der Prozessdauer, der örtlichen oder zeitlichen zyklischen Fälligkeit, der Anzahl Nachfolgeprozesse und der letzten Durchführung nach Ort und Zeit. Zusätzlich sind alle Prozesse (anhand der Prozessnummern) einzutragen, deren parallele Durchführung zum neu anzulegenden Prozess technisch möglich ist. Die folgende Abb. zeigt die Eingabemaske für das Anlegen eines neuen Prozesses.

Prozess hinzufügen										
Prozess- Nummer (fortlaufend)	Prozess- Bezeichnung (bestimmen)	Parallelitäts- Möglichkeiten (auswählen)	Ressourcen (bestimmen)							
			KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra
Prozess- Dauer [min]	Zyklische Fälligkeit Ort [m]	Zyklische Fälligkeit Zeit [min]	Häufigkeit	Letzte Durchführung Ort [m]		Letzte Durchführung Zeit [min]				

Abb. 77: Eingabemaske für die Anlage eines neuen Prozesses⁴⁸⁶

⁴⁸⁶ Für die Arbeit optimierter Screenshot des Prozessmodells. Ein Screenshot des Prozessmodells ist in Anlage 2.3: Prozessmodell Seite Prozessanlage dargestellt.

8.7 Beispiele für verschiedene Fälle der Prozessstörungen

Im Folgenden wird für vier verschiedene Störungen der DWEP beispielhaft simuliert, welche Vorschläge das Prozessmodell macht. Es werden realitätsnahe Situationen ausgewählt, die in ähnlicher Form stattgefunden haben bzw. denkbar sind. Der erste Fall zeigt einen IWEP („**Kontrollvermessung**“), der nicht parallel zu einem DWEP ausführbar ist. Im zweiten Fall wird der **Rohreinbau** gestört, da (z.B. aufgrund eines Verkehrsstaus) keine Rohre zum Einbau vorhanden sind. Eine Betriebsstörung der **Dehnerstation** wird im dritten Fall behandelt und im letzten Fall eine „**Sonstige Störung**“.

8.7.1 Systembedingte Ausfallzeit

In diesem Beispiel konnten die DWEP Vortrieb und Rohreinbau optimal und ohne Unterbrechungen ausgeführt werden. Allerdings ist eine Tunnellänge erreicht, an welcher der IWEP „**Kontrollvermessung**“ nicht weiter aufgeschoben werden kann, also eine Fälligkeit von 10 hat. Dieser IWEP wird somit zum Leitprozess.

The screenshot displays a software interface for process management. At the top, it shows the date '04.06.2017' and the location 'Haltung Holstenwall'. Below this, a resource allocation table is shown with columns for 'KF', 'Schl', 'SchFü', 'Elek', 'SchFa', 'Sepa', 'Mech', and 'Extra', each with a value of 1. The main section is titled 'Leitprozess' and shows '304 Kontrollvermessung' with an 'Erwartete Dauer' of 180 minutes, 'Tunnelfortschritt' of 215 meters, and 'Arbeitsdauer' of 20.745 minutes. A 'Ressourcenakzeptanz' of +/- 0 is also indicated. To the right, there are buttons for 'Parallelprozess Suche starten' and 'Prozess dokumentieren'. Below the main section, a table lists 'Parallelprozess(e)' with columns for 'Rang', 'P.-Nr.', 'Prozessname', 'Ressourcen' (KF, Schl, SchFü, Elek, SchFa, Sepa, Mech, Extra), 'E. Dauer [min]', 'Fälligkeit', and 'Häufigkeit'. The table contains 11 rows of data, with the first row 'Rohr Ausstattung' having a 'Fälligkeit' of 10.

Rang	P.-Nr.	Prozessname	KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	E. Dauer [min]	Fälligkeit	Häufigkeit
1	324	Rohr Ausstattung	1	1	0	0	0	0	0	0	30	10	105
2	305	Wartung-Abschmieren	0,5	0	0	0	1	0	0	0	10	5	4
3	306	Auffüllen Hydrauliköl	0,5	0	0	0	1	0	0	0	15	5	4
4	303	Kabelverlängerung Pumpe	1	1	1	1	1	0	1	0	60	4	4
5	302	Kabelverlängerung TBM	1	1	1	1	1	0	1	0	60	3	4
6	609	Betriebsstörung Förderpumpe	0,5	0	1	0	1	1	1	0	30	2	3
7	605	Betriebsstörung Widerlager	0,5	0	1	0	0	0	1	0	30	2	2
8	602	Betriebsstörung Rohrbremse	0,5	0	1	0	0	0	1	0	30	2	1
9	603	Betriebsstörung Dehnerstation	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	2	1
10	801	Betriebsstörung Separieranlage	0	0	1	0	0	1	1	0	30	1	1
11	301	Förderkreislauf fahren	0,5	0	1	0	1	1	0	0	10	0	54

Abb. 78: Beispiel - Systembedingte Ausfallzeit - Kontrollvermessung⁴⁸⁷

Die Kontrollvermessung wird spätestens alle 80 Meter fällig. Ein Spezialist (unternehmensintern oder -extern) ist für diese Maßnahme einzuplanen (siehe Ressource „Extra“) und rechtzeitig zu verständigen. Ein Blick auf die ständig aktualisierte Fälligkeit kann dient als Hilfestellung. Der Kranfahrer ist in Bereitschaft (0,5) für den Rettungsfall vorzuhalten. Für die Vermessung wurde eine Dauer von drei Stunden angesetzt. Der IWEP „**Rohr Ausstattung**“ ist annähernd kontinuierlich auszuführen. Für diesen Prozess ist sicherzustellen, dass die Ressource Kran nicht während der Vermessung in Verwendung ist. Es ist zu erwarten, dass mindestens die IWEP „**Wartung-Abschmieren**“ und „**Auffüllen Hydrauliköl**“ in der Zeit der Vermessung ausgeführt werden können. Ihre Fälligkeit wird somit auf 0 gesetzt. Auch die präventive Kontrolle der **Förderpumpe** (Prozess 609) könnte als IWEP ausgeführt werden.

⁴⁸⁷ Für die Arbeit optimierter Screenshot des Prozessmodells.

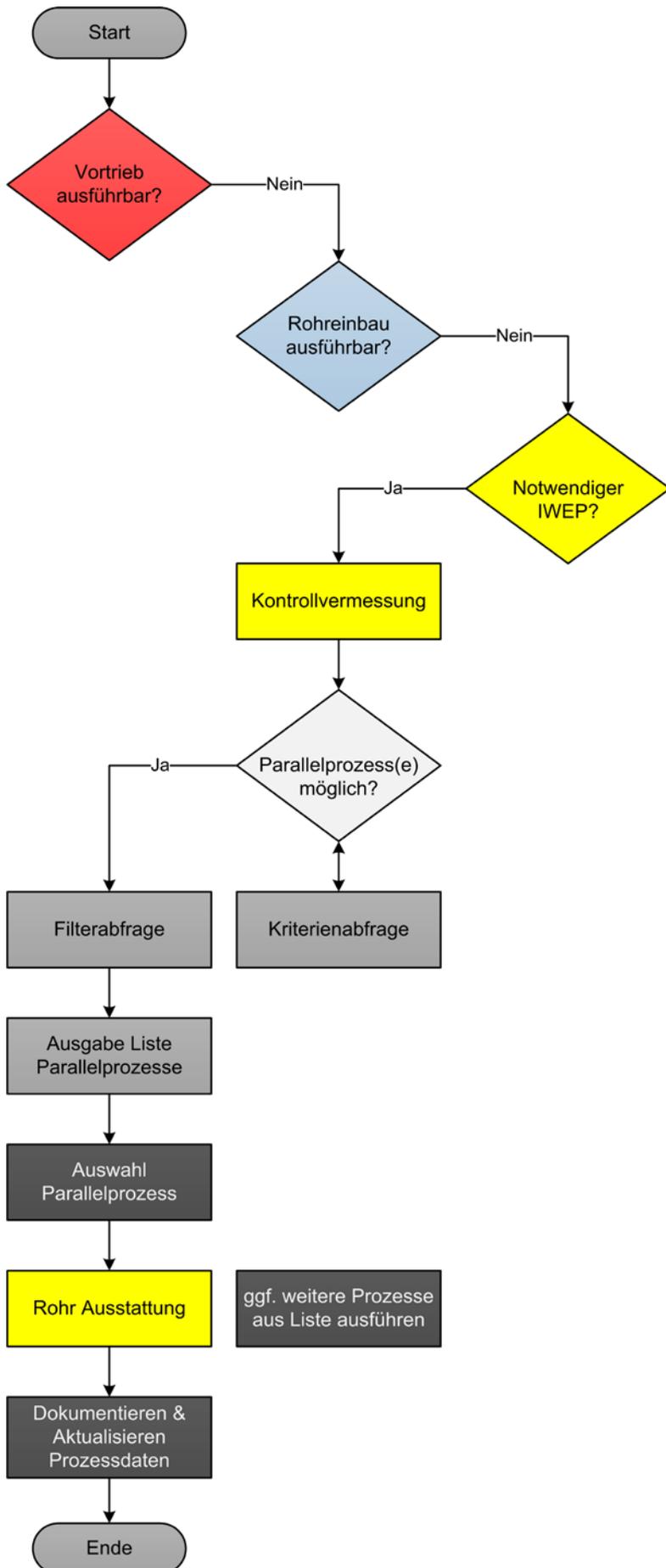


Abb. 79: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - IWEP - Kontrollvermessung

8.7.2 Wartezeit

Lassen es die Platzverhältnisse zu, so wird stets ein ausreichender Puffervorrat an Rohren vorgehalten. Jedoch kann es speziell bei Bauprojekten in der Innenstadt zu beengten Baustellenverhältnissen mit geringem Platzangebot für die Logistikfläche kommen.

In diesem Beispiel kommt es zu der Situation, dass die Vortriebsrohre nicht schnell genug geliefert werden können, um mit der Vortriebsgeschwindigkeit mitzuhalten. Der Vorrat an Rohren ist folglich aufgebraucht.

Die Behebung des Störprozess „**Wartezeit Rohre**“ wird zum **Leitprozess**, sobald der Vortrieb nicht weiter ausführbar ist. Die Vortriebsgeschwindigkeit könnte für diesen Fall, sollte eine geringere Geschwindigkeit ressourcensparend sein, angepasst werden. Auch wenn ein schnellerer Vortrieb (Bohren) (z.B. durch einen erhöhten Einsatz von Personal und Ressourcen) möglich ist, hätte dies negative Auswirkungen, da Ressourcen verbraucht werden, ohne dass durch dieses Vorgehen ein Vorteil für den Gesamtprozess erarbeitet wird. Ist der Leitprozess „Wartezeit Rohre“ nicht durch höheren Ressourceneinsatz zu beschleunigen, können mit Hilfe des Prozessmodells mögliche Parallelprozesse gefunden werden, die während der Wartezeit ausgeführt werden können.

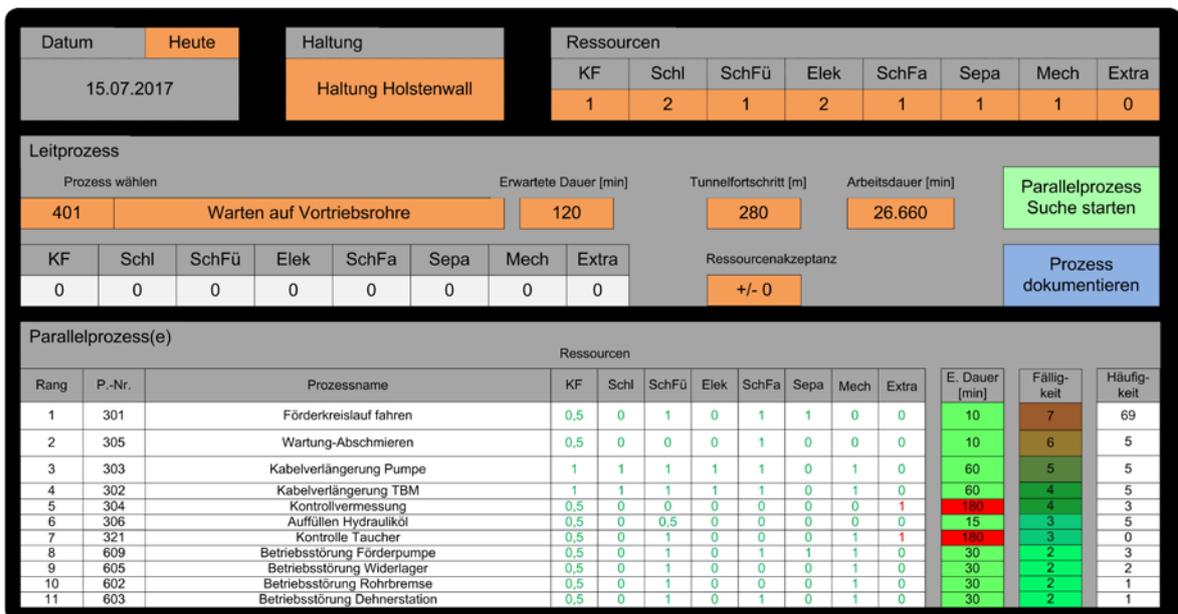


Abb. 80: Beispiel - Störprozess - Warten auf Vortriebsrohre

Wie die obige Abbildung zeigt, sind mehrere Prozesse parallel zur Wartezeit möglich. Diese wird vom verantwortlichen Personal nach Rücksprache mit dem Lieferanten auf zwei Stunden angesetzt. Da für diesen NWEK kein Personal benötigt wird, sind bei keinem Parallelprozess (ausgenommen bei Bedarf Externer, z.B. Vermesser) Ressourcenengpässe zu erwarten. Zu erkennen ist, dass der IWEK „**Förderkreislauf fahren**“ zwar nur eine Fälligkeit von 7 hat, also erst spätestens nach dem nächsten Vortriebsdurchlauf auszuführen ist, jedoch vorgezogen werden kann. Ebenso sind die IWEK „**Wartung-Abschmieren**“ und „**Kabelverlängerung Pumpe**“ in der Zeit des Stillstandes ausführbar.

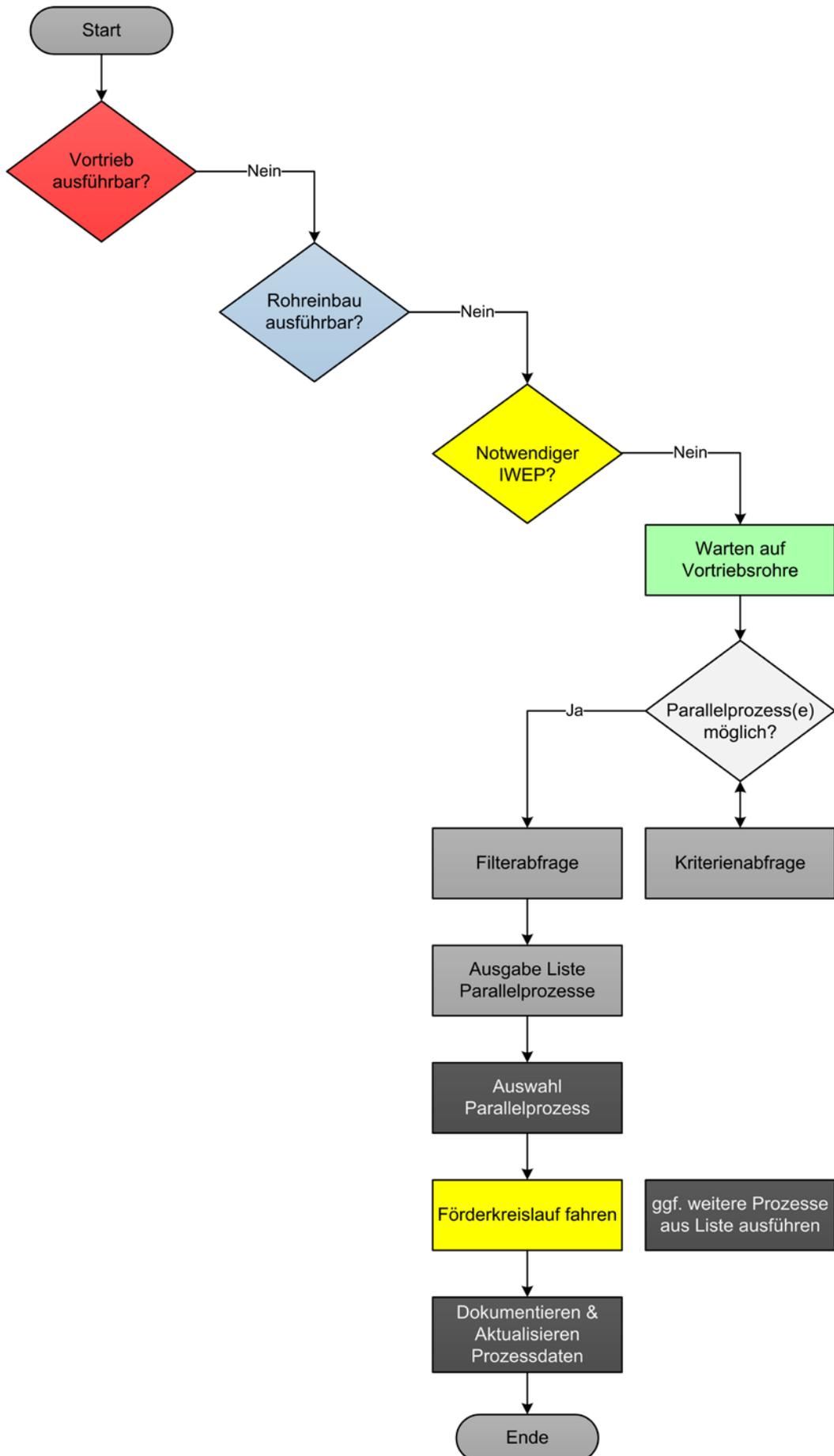


Abb. 81: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - NWEP - Wartezeit

8.7.3 Betriebsstörung

Das Auftreten von Betriebsstörungen bzw. Defekten an Maschinen und Gerätschaften lässt sich durch regelmäßige Kontrollen und sachgemäßen Gebrauch verringern, jedoch selten komplett verhindern.

In diesem Beispiel kommt es zu dem NWEP „**Betriebsstörung Dehnerstation**⁴⁸⁸“. Während der Störung des Dehner ist weder der Vortrieb noch der Rohreinbau weiter ausführbar. Die Behebung dieser Störung nimmt i.d.R. nicht viel Zeit in Anspruch. Auch in diesem Fall wird die erwartete Dauer von 30 Minuten ausreichen. Jedoch sind für die Behebung neben dem Schildfahrer auch der Schichtführer und ein Mechaniker notwendig. Der Kranfahrer (0,5) ist für den Rettungsfall zur Bereitschaft vorzuhalten.

Datum		Haltung		Ressourcen							
09.08.2017		Haltung Holstenwall		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra
				1	2	1	2	1	1	1	0

Leitprozess									
Prozess wählen		Erwartete Dauer [min]		Tunnelfortschritt [m]		Arbeitsdauer [min]		Parallelprozess	
603	Betriebsstörung Dehnerstation	30		330		23.210		Suche starten	
KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	Ressourcenakzeptanz	
0,5	0	1	0	1	0	1	0	+/- 0	
Prozess dokumentieren									

Parallelprozess(e)													
Ressourcen													
Rang	P.-Nr.	Prozessname	KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	E. Dauer [min]	Fälligkeit	Häufigkeit
1	324	Rohr Ausstattung	1	1	0	0	0	0	0	0	30	10	164
2	306	Auffüllen Hydrauliköl	0,5	0	0	0	1	0	0	0	15	8	6
3	303	Kabelverlängerung Pumpe	1	1	1	1	1	0	1	0	60	7	6
4	302	Kabelverlängerung TBM	1	1	1	1	1	0	1	0	60	6	6
5	304	Kontrollvermessung	0,5	0	0	0	0	0	0	1	180	5	4
6	306	Wartung-Abschmieren	0,5	0	0	0	1	0	0	0	10	4	6
7	301	Förderkreislauf fahren	0,5	0	1	0	1	1	0	0	10	3	83
8	609	Betriebsstörung Förderpumpe	0,5	0	1	0	1	1	1	0	30	1	3
9	605	Betriebsstörung Widerlager	0,5	0	1	0	0	0	1	0	30	1	2
10	602	Betriebsstörung Rohrbremse	0,5	0	1	0	0	0	1	0	30	1	1
11	603	Betriebsstörung Dehnerstation	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	1	1

Abb. 82: Beispiel - Störprozess - Betriebsstörung Dehnerstation

Das Prozessmodell zeigt an, dass verschiedene Parallelprozesse möglich sind. Für den IWEF „**Rohr Ausstattung**“ ist sicherzustellen, dass der Kranfahrer nicht während der Arbeiten im Schacht beschäftigt ist. Die Ausstattung der Rohre nimmt etwa die gleiche Zeit in Anspruch wie der NWEP, jedoch zeigt die Fälligkeit an, dass das nächste Rohr für den nächsten Einbau ausgestattet werden muss und selbst unmittelbar davorsteht, der Leitprozess zu werden. Falls ein anderer Arbeiter (z.B. Elektriker) die Aufgabe des Schildfahrers beim „**Auffüllen Hydrauliköl**“ erbringen kann, ist auch dieser IWEF während der Betriebsstörung durchführbar. Die weiteren möglichen Parallelprozesse wie die „**Kabelverlängerung Pumpe**“ oder „**Kabelverlängerung TBM**“ dauern zu lange. Sie würde über die Dauer des Leitprozesses hinausgehen. Da sie nur Fälligkeiten von 7 bzw. 6 haben, selbst begrifflich zu NWEP werden.

⁴⁸⁸ Herrenknecht, 2018: „Als Dehner bzw. Zwischenpressstation werden zylindrische Stahlmäntel mit integrierten Hydraulikzylindern bezeichnet, die beim Rohrvortrieb in definierten Abständen in den Rohrstrang eingebaut werden. Sie teilen den gesamten Rohrstrang in einzelne Bereiche auf, reduzieren so die benötigte Vorpressekraft am Pressenrahmen im Startschacht und ermöglichen sehr lange Rohrvortriebe.“

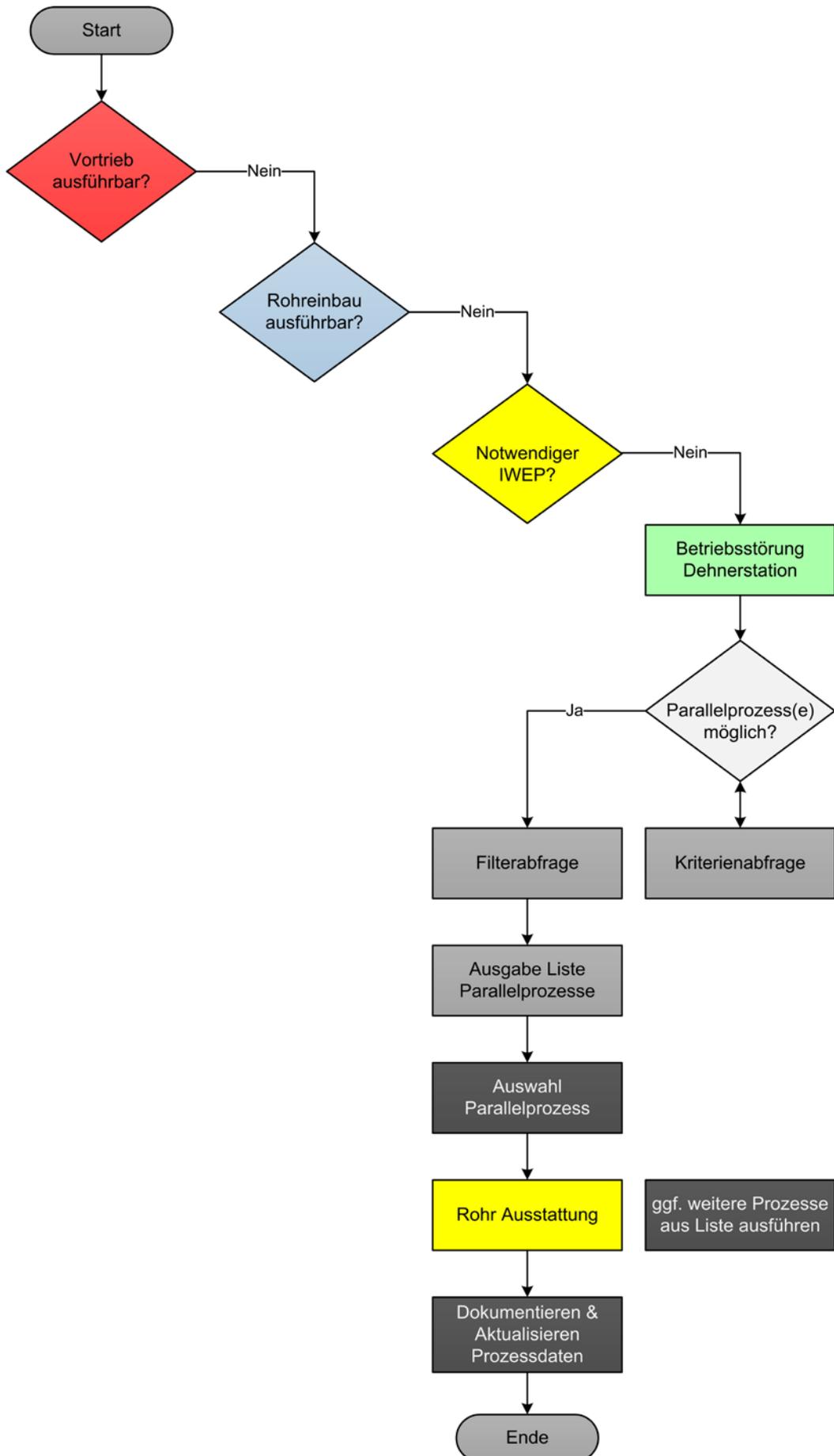


Abb. 83: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - NWEF - Betriebsstörung

8.7.4 Sonstige Störung

Zur Prozessgruppe der sonstigen Störungen zählen außergewöhnliche, weniger bauspezifische Störungen, die keiner der anderen NWEP-Arten zuzuordnen sind. Eine Rettungsübung der lokalen Feuerwehr kann vom Bauunternehmen selbst (SiGeKo⁴⁸⁹) oder bspw. auch vom Aufsichtsamt angefordert werden. Bei dieser Übung wird das Verhalten im Notfall (Brand, Überschwemmung, Personenschaden, etc.) sowohl des Baustellenpersonals wie auch der Rettungsmannschaft geschult.

In diesem Beispiel wird für den NWEP „**Rettungsübung**“ eine Dauer vier Stunden angesetzt. Mindestens ein Arbeiter jedes Fachbereichs ist vom Baustellenpersonal verpflichtet, an der Rettungsübung (passiv) teilzunehmen. Für die Ressource „Extra“ wurde 1 eingetragen, womit das komplette externe Rettungsteam abgegolten ist.

Datum		Haltung		Ressourcen							
09.08.2017		Haltung Holstenwall		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra
				1	2	1	2	1	1	1	1

Leitprozess									
Prozess wählen		Erwartete Dauer [min]		Tunnelfortschritt [m]		Arbeitsdauer [min]		Parallelprozess	
906	Rettungsübung	240		370		36.525		Suche starten	
KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	Ressourcenakzeptanz	
1	1	1	1	1	1	1	1	+/- 0	
Prozess dokumentieren									

Parallelprozess(e)														
				Ressourcen								E. Dauer [min]	Fälligkeit	Häufigkeit
Rang	P.-Nr.	Prozessname		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra			
1	324	Rohr Ausstattung		1	1	0	0	0	0	0	0	30	10	182
2	306	Förderkreislauf fahren		0,5	0	1	0	1	1	0	0	10	3	7
3	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
4	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
5	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
6	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
7	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
8	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
9	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
10	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
11	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0

Abb. 84: Beispiel - Störprozess - Rettungsübung

Wie in der obigen Abb. Ersichtlich ist, können nur zwei Prozesse nach der Kriterienabfrage parallel zur Rettungsübung erbracht werden. Liegt das als nächstes **auszustattende Rohr** und alle notwendigen Einbauten, für welche ein Kran notwendig ist, bereits an der richtigen Stelle, kann der Schlosser, der nicht an der Rettungsübung teilnimmt, dieses ausstatten. Ggf. können auch weitere Rohre bereits ausgestattet werden. Sind die Rohre für die Ausstattung jedoch noch mit dem Kran zu bewegen (wie beispielhaft in diesem Fall), um ausgestattet zu werden, ist dieser Prozess nicht parallel möglich. Auch der IWEP „**Förderkreislauf fahren**“ ist nur auf einer Baustelle mit mehr Personal möglich. Bei diesem Projekt ist die Anzahl nicht ausreichend. Somit ist kein weiterer Prozess parallel möglich.

⁴⁸⁹ Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinator.

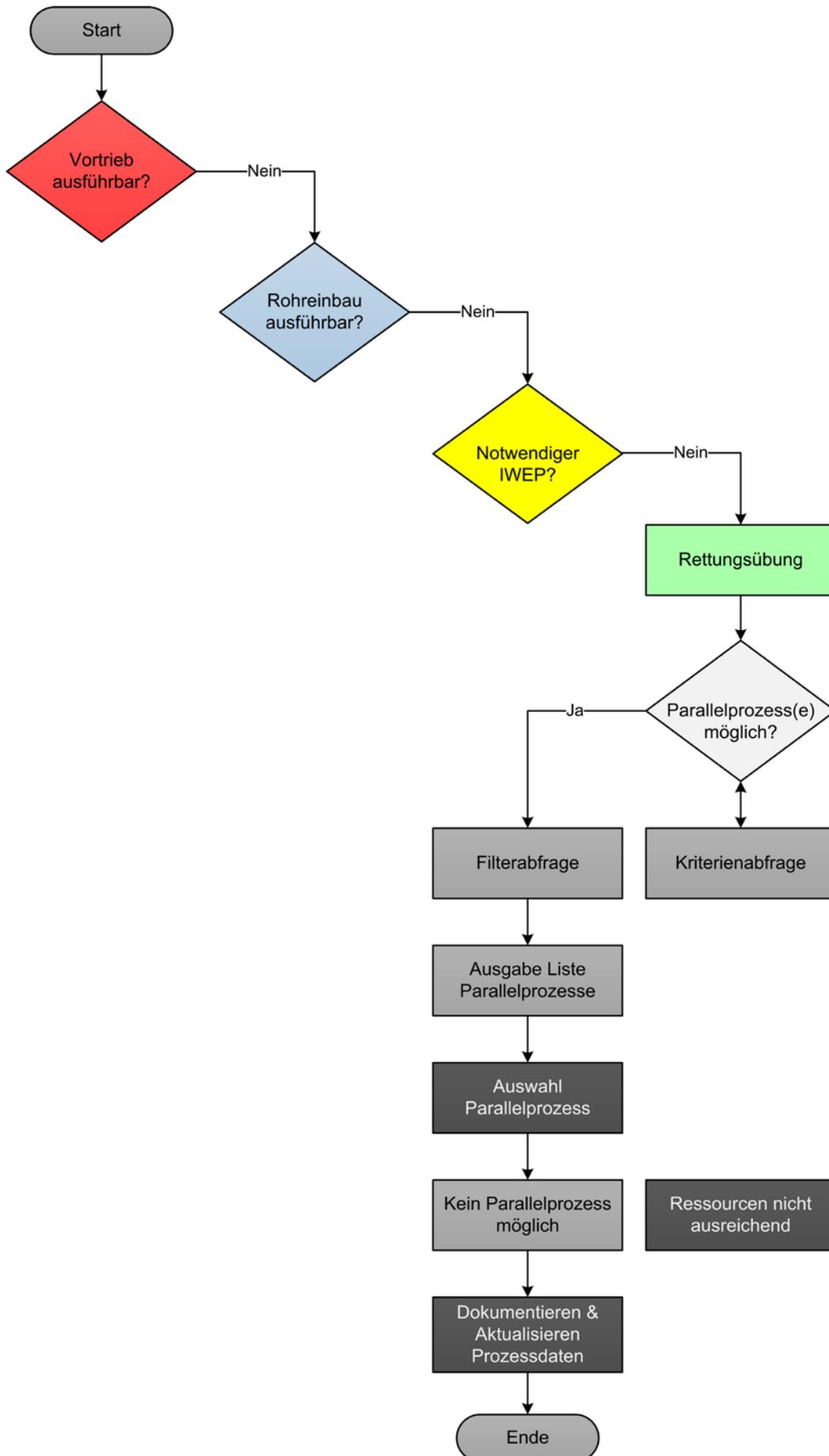


Abb. 85: Flussdiagramm Ablauf Prozessmodell - NWEP - Sonstige

9 Ergebnisse und Schlussbetrachtung

9.1 Ergebnisüberblick und Zusammenfassung

Die Bauindustrie erlebt seit einigen Jahren einen gewaltigen Aufschwung aufgrund der stark steigenden Bauinvestitionen, woran der Tiefbau einen erheblichen Anteil hat. So erfreulich diese Entwicklung ist, so ernüchternd ist die Entwicklung der Produktivität des Baubetriebes im Vergleich dazu. Diese **geringe Steigerung der Produktivität** lässt es nicht zu, dass die Gewinne der Bauunternehmen im gleichen Maße anwachsen wie die Auftragseingänge. Zu den Hauptursachen für diesen Umstand können schlechte Planung, geringe Nutzung (digitaler) Hilfsmittel, Verschwendungen im Baubetrieb und das **Verhalten bei Planabweichungen** gezählt werden. Ein vergleichender Blick auf die Automobilindustrie zeigt, dass diese der Bauindustrie bzgl. der Produktivitätsentwicklung deutlich voraus ist. Zwar sind die Unterschiede der beiden Industrien groß, jedoch verspricht die Adaption einiger in der stationären Industrie angewandeter Methoden und Denkweisen positive Veränderungen. Speziell das Lean Thinking hat mit dem **Lean Construction** bereits im Bauwesen Einzug gehalten. Planung, Produktionsabläufe und Zusammenarbeit werden durch die angepasste Anwendung des Lean Gedankens verbessert und so kommt man der produktiven, verschwendungsfreien Bauproduktion immer näher. Der besondere Bereich **Tunnelvortrieb** ist im Vergleich zur stationären Industrie deutlich mehr insbesondere exogenen Einflüssen ausgesetzt. Diese führen zu Schwankungen und **Störungen** des geplanten Ablaufes, welche zum Teil als normal angesehen werden müssen. Die Reaktionen auf diese außerplanmäßigen Situationen (die zum Stillstand der Werterzeugung führen) sind i.d.R. mit Kostenanstiegen, Qualitätsverlusten, zeitlichen Verzögerungen oder mit Kombinationen dieser Konsequenzen verbunden, da aufgrund der Komplexität der Bauproduktion selten eine schnelle, flexible und - ganzheitlich betrachtet - optimale **Plananpassung** möglich ist. Grund hierfür ist, dass für die Reaktionen auf diese Störungen kaum **Hilfsmittel** vorhanden sind und diese Reaktionen oft **nicht standardisiert** und somit auf Erfahrung von Personen beruhend, intuitiv sind. Während des durch diese Störungen entstehenden Stillstands wird **Potential** in Form von Ressourcen (Personal, Maschinen, Zeit, etc.) freigesetzt, das für die ausfallenden Prozesse eingeplant war. Nicht nur die Störung selbst, sondern auch die Nichtnutzung dieses Potentials stellt eine **Verschwendung** dar, die zu beheben ist. Das zentrale Ziel dieser Arbeit besteht in der Beantwortung der Forschungsfrage:

**Ist es möglich,
im Falle einer Störung, die Prozessabfolge kurzfristig umzustellen,
um die Gesamtprozessproduktivität
zu optimieren?**

Zur Beantwortung dieser Frage wurde der Fokus auf die Entwicklung eines praktisch anwendbaren Hilfsmittels gelegt, welches insbesondere in außerplanmäßigen Situationen sinnvolle Lösungsvorschläge liefern kann. Untersucht wurde, ob der geplante Ablauf der Arbeiten kurzfristig umgestellt werden kann, indem die durch eine Störung entstehenden Potentiale während des Stillstandes optimal ausgenutzt werden und, abgesehen von der bereits bestehenden Störung, keine weitere Verschwendung von Zeit, Kosten und Qualität zugelassen wird.

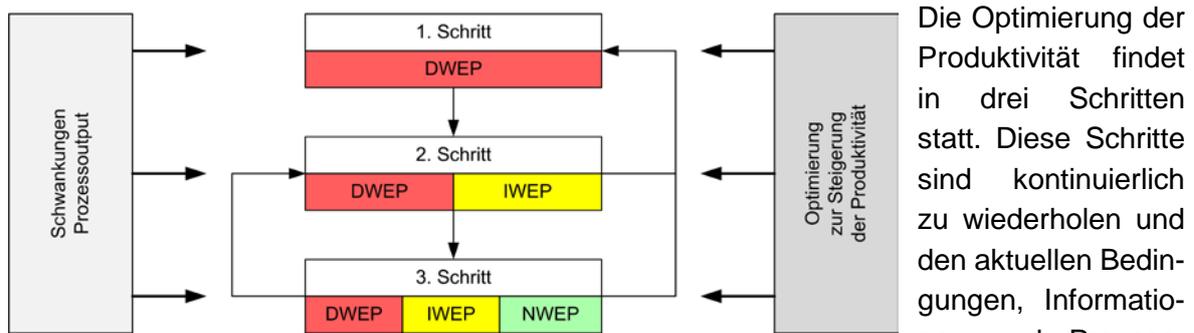
Damit die Reaktionen auf eine Störung weniger intuitiv (und damit möglicherweise falsch) ausfallen, wurden in einem ersten Schritt zur Entwicklung des prozessorientierten Modells unterschiedliche Prozesskategorien definiert. Hiermit sollte die weiterführende Forschungsfrage beantwortet werden:

**Ist es jederzeit möglich,
den Prozess zu identifizieren,
der für die Produktivitätsoptimierung maßgebend ist?**

Um zu jedem Zeitpunkt innerhalb der Bauproduktion zu wissen, ob der aktuelle Prozess ganzheitlich betrachtet, also bzgl. des Gesamtprozessziels, produktiv ist, wurden verschiedene

DWEP	Schlüsselprozesse
IWEP	Unterstützungsprozesse
NWEP	Störprozesse

Prozesskategorien definiert. Durch diese Definitionen und die Zuordnung der einzelnen Prozesse zu diesen ergab sich eine Struktur, anhand derer jederzeit der - bzgl. der Gesamtprozessproduktivität - sinnvollste Prozess ausgeführt werden kann. Die Kategorisierung erfolgte durch die Orientierung an der Werterzeugung der Prozesse. Die Schlüsselprozesse sind geplante Prozesse, die aus Sicht des Kunden einen tatsächlichen Wert erzeugen und als **Direkt Werterzeugende Prozesse (DWEP)** definiert werden. Die Unterstützungsprozesse oder auch systembedingten Ausfallzeiten sind einzuplanende Prozesse, die aus Sicht des Kunden keinen Wert erzeugen, jedoch für die Werterzeugung bzw. die Unterstützung der DWEP notwendig sind. Sie werden als **Indirekt Werterzeugende Prozesse (IWEP)** definiert. Störprozesse sind zur Behebung von Störungen notwendig, somit außerplanmäßig und verhindern die direkte und indirekte Werterzeugung der DWEP und IWEP. Grundsätzlich sind Störungen unter allen Umständen zu vermeiden und Störprozesse werden als **Nicht-Werterzeugende Prozesse (NWEP)** definiert.

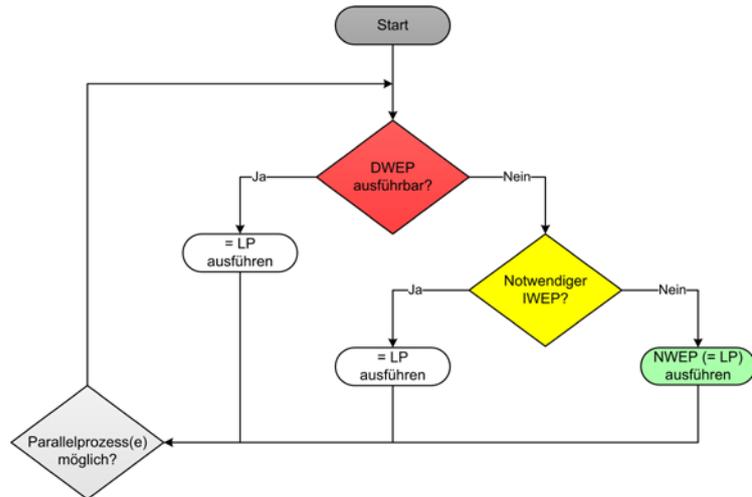


Die Optimierung der Produktivität findet in drei Schritten statt. Diese Schritte sind kontinuierlich zu wiederholen und den aktuellen Bedingungen, Informationen und Prozessschwankungen anzupassen. Im ersten Schritt werden alle DWEP isoliert betrachtet und optimiert. Im zweiten Schritt werden zusätzlich die IWEP betrachtet, für diese der erste Schritt durchgeführt, die Abhängigkeiten aller DWEP und IWEP analysiert und die Abfolge bzw. Anordnung und die Ressourceneinteilung optimiert. Der dritte Schritt bedingt eine Reaktion bzw. Steuerung, da die außerplanmäßigen NWEP zu berücksichtigen sind. Die Abhängigkeiten aller Prozesse sind neu zu analysieren und die Anordnung und Ressourceneinteilung zu optimieren. Dies führt zur Optimierung der Produktivität unter den gegebenen Bedingungen des Störfalles. Dieser Schritt ist das Hauptaugenmerk des in dieser Arbeit entwickelten Prozessmodells.

Um auch im dritten Schritt jederzeit bestimmen zu können, welcher Prozess Priorität hat, also auszuführen ist, damit der Gesamtprozess optimiert wird, wurde der Begriff des **Leitprozesses (LP)** eingeführt:

Ist die Ausführung eines DWEP **möglich**, so ist dieser der Leitprozess. Ist die Ausführung eines DWEP **nicht** möglich, ist der Prozess, welcher die Ausführung eines DWEP verhindert, der Leitprozess. Dieser kann entweder ein notwendiger IWEP oder ein NWEP sein.

Die Ausführung des Leitprozesses hat die **höchste Priorität**.

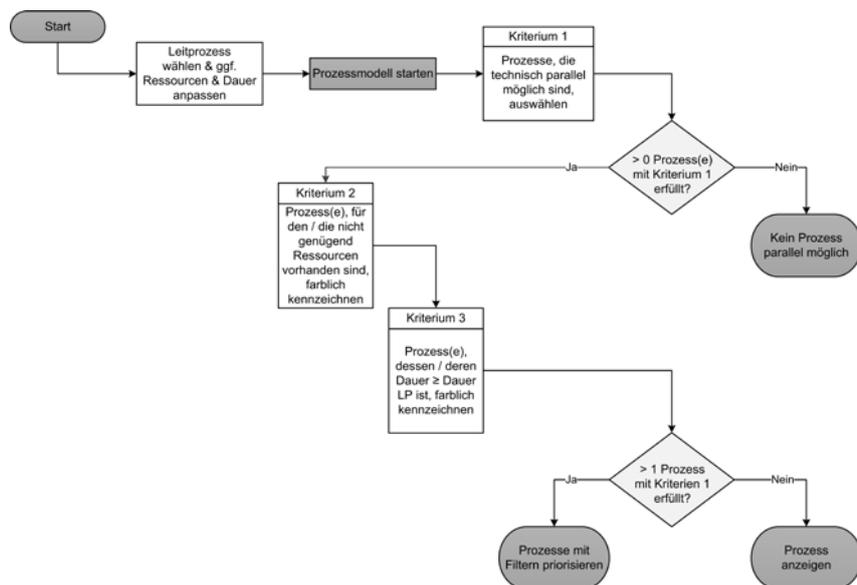


Damit die Produktivität des Gesamtprozesses aufgrund eines Stillstandes, verursacht durch eine außerplanmäßige Situation, möglichst geringfügig negativ beeinflusst wird, ist es notwendig die Kapazität zukünftiger werterzeugender Prozesse zu optimieren, womit eine zusätzliche weiterführende Frage beantwortet wird:

**Ist es möglich,
das verfügbare Potential während eines Stillstandes
kurzfristig zu nutzen, um die Kapazität zukünftiger
wernerzeugender Prozesse zu optimieren?**

Die aufgrund einer außerplanmäßigen Situation entstandenen Potentiale (Personal, Maschinen, Zeit, etc.) können sinnvoll - bzgl. der Gesamtprozessproduktivität - genutzt werden, indem Prozesse, die die Kapazität zukünftiger werterzeugender Prozesse negativ beeinflussen, bereits während des aktuellen Stillstandes (ermöglicht durch die neuentstandenen Potentiale) ausgeführt werden.

Um derartige Ablaufänderungen kurzfristig zu ermöglichen, muss mit eindeutigen Kennzahlen ermittelbar sein, welche Prozesse parallel zum Leitprozess möglich sind und zudem welche dieser

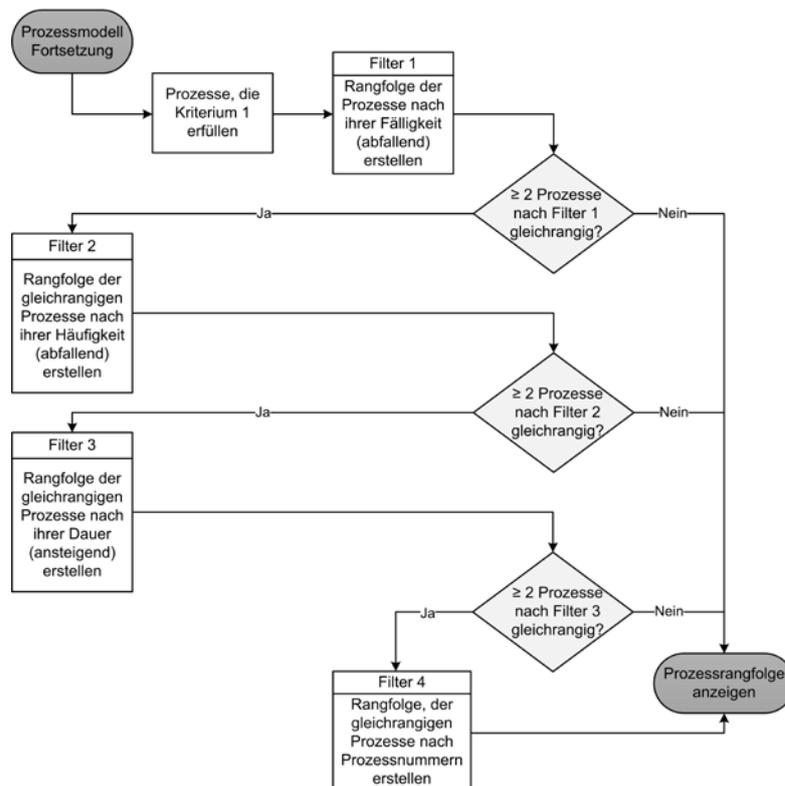


Prozesse - ganzheitlich betrachtet - sinnvoll sind. Hierzu werden Kriterien und Filter definiert, die sich anhand der Prozessdaten abfragen lassen.

In einem ersten Schritt werden anhand von **Kriterien** die Prozesse ermittelt, deren Ausführung parallel **möglich** ist. Sind mehr als ein Prozess möglich, werden diese Prozesse in einem zweiten Schritt bzgl. ihres zukünftigen Einflusses **sinnvoll** anhand von **Filtern geordnet** (= priorisiert).

Diese mit dem Prozessmodell für die individuelle Situation ermittelte Liste dient dem verantwortlichen Personal als Entscheidungshilfe. Ob die möglichen Prozesse tatsächlich vorgezogen werden, ist dann von diesem zu entscheiden.

Bei der Kriterienabfrage werden automatisch bestimmte **Kennzahlen** bzgl. des aktuellen Zustands des Vortriebs, der laufenden Prozesse, der Ressourcen in Verwendung, der insgesamt verfügbaren Ressourcen, des Ortes des Vortriebs (Tunnelmeter), der Dauer des Vortriebs (produktive Vortriebszeit) und der Dauer des aktuellen Leitprozesses gegenübergestellt und miteinander abgeglichen. Alle vor Beginn des Projektes im Modell hinterlegten Prozesse stehen in einer Liste für diese Abfrage zur Verfügung. Mit dieser werden alle Kriterien nacheinander abgefragt, wobei die Reihenfolge der Kriterien ohne Bedeutung ist, da alle definierten Kriterien erfüllt werden müssen, damit ein Prozess parallel ausführbar ist.



In dem für das Rohrvortriebsprojekt angepassten Prozessmodell wurden drei Kriterien definiert, wobei nur das Kriterium der **Technischen Möglichkeit** tatsächlich Prozesse ausschließt. Die notwendigen **Ressourcen** (zweite Kriterium) und die **Prozessdauer** (dritte Kriterium) wurden hingegen farblich gekennzeichnet, um dem verantwortlichem Baustellenpersonal einen Handlungsspielraum zu gewährleisten.

Sind mehrere Prozesse unter den gegebenen Umständen parallel zum aktuellen Leitprozess möglich, erfolgt

eine Priorisierung dieser anhand verschiedener Filter. Auf diese Weise wird dem Nutzer des Prozessmodells eine Liste aller möglichen Parallelprozesse, welche gemäß den gewählten Präferenzen geordnet ist, als Hilfestellung zur Verfügung gestellt.

Hierbei erfolgt automatisch ein Abgleich mit dem aktuellen Zustand des Vortriebs bzgl. des **aktuellen Ortes** des Vortriebs und der **Dauer** des Vortriebs sowie der Prozessdaten, der Prozesshäufigkeit und des letztmaligen Auftretens der Prozesse hinsichtlich des Ortes und der Zeit ihrer Durchführung. Die Filter werden nach der vorgegebenen Reihenfolge einer nach dem anderen durchlaufen und die Parallelprozesse somit in einer eindeutigen

Rangfolge angeordnet. Die beim Rohrvortriebsprojekt verwendeten Filter waren die **Fälligkeit, Häufigkeit** und **Dauer** der Prozesse sowie die **Prozessnummer**.

Für die Verwendung der Kriterien und Filter sind aktuelle Daten notwendig. Um dies zu ermöglichen, war noch eine zusätzliche weiterführende Forschungsfrage zu beantworten:

Ist es möglich, die in einem Projekt gewonnen Prozessdaten unmittelbar zu dokumentieren, zu nutzen und eine kontinuierliche Verbesserung der Produktivität zu erreichen?

Die Beantwortung dieser Frage führte zur Umsetzung des wichtigsten Prinzips des Toyota-Produktionssystems bzw. des Lean Thinking, dem Kaizen- bzw. dem Kontinuierlichen Verbesserungsprinzips. Ziel dieser ist die nachhaltige Verringerung bzw. vollständigen Vermeidung von Verschwendungen im Produktionsprozess. Dieses Ziel soll anhand der kontinuierlichen Dokumentation der auftretenden Prozesse erreicht werden, wobei alle gewonnen Prozessinformationen gesammelt und die im Prozessmodell hinterlegten Prozessdaten fortwährend aktualisiert werden. Auf diesem Weg kann durchgehend aus Fehlern bzw. Störungen gelernt und diese zukünftig präventiv verhindert bzw. ihr mögliches Auftreten eingeplant werden.

Datum		Heute		Haltung				Ressourcen																
09.08.2017				Haltung Holstenwall				KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra									
								1	2	1	2	1	1	1	0									
Leitprozess																								
Prozess wählen				Erwartete Dauer [min]				Tunnelfortschritt [m]				Arbeitsdauer [min]				Parallelprozess Suche starten								
603				Betriebsstörung Dehnerstation				30				330				23.210								
KF		Schl		SchFü		Elek		SchFa		Sepa		Mech		Extra		Ressourcenakzeptanz				Prozess dokumentieren				
0,5		0		1		0		1		0		1		0		+/- 0								
Parallelprozess(e)																								
Ressourcen																								
Rang	P.-Nr.	Prozessname						KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	E. Dauer [min]	Fälligkeit	Häufigkeit						
1	324	Rohr Ausstattung						1	1	0	0	0	0	0	0	30	10	164						
2	306	Auffüllen Hydrauliköl						0,5	0	0	0	1	0	0	0	15	8	6						
3	303	Kabelverlängerung Pumpe						1	1	1	1	1	0	1	0	60	7	6						
4	302	Kabelverlängerung TBM						1	1	1	1	1	0	1	0	60	6	6						
5	304	Kontrollvermessung						0,5	0	0	0	0	0	0	1	180	5	4						
6	306	Wartung-Abschmieren						0,5	0	0	0	1	0	0	0	10	4	6						
7	301	Förderkreislauf fahren						0,5	0	1	0	1	1	0	0	10	3	83						
8	609	Betriebsstörung Förderpumpe						0,5	0	1	0	1	1	1	0	30	1	3						
9	605	Betriebsstörung Widerlager						0,5	0	1	0	0	0	1	0	30	1	2						
10	602	Betriebsstörung Rohrbremse						0,5	0	1	0	0	0	1	0	30	1	1						
11	603	Betriebsstörung Dehnerstation						0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	1	1						

Überprüfung der Anforderungen an das Prozessmodell

Damit das Prozessmodell den in der Forschungsfrage gestellten Anforderungen nach einer **kurzfristigen** Reaktion und der **Optimierung des Gesamtprozesses** gerecht wird, wurden verschiedene Grundlagen bei der Modellentwicklung im besonderen Maße berücksichtigt. Für eine **ganzheitliche** Betrachtung werden alle Prozesse vollumfänglich mitsamt ihren gegenseitigen Abhängigkeiten erfasst, nachvollziehbar und transparent im Prozessmodell dargestellt. Eine kurzfristige Reaktion auf eine Störung kann nur gewährleistet werden, wenn die Anwendung des Prozessmodells **einfach, effizient** und **intuitiv** möglich ist, was durch die Einfachheit der Bedienungsoberfläche gewährleistet wird. Da sich selbst bei

ähnlichen Bauprojekten die Bedingungen stark unterscheiden können, ist das Prozessmodell so konzipiert, dass es **flexibel, anpassbar, erweiterbar** und **optimierbar** ist, um für verschiedenen Anwendungsgebiete, Eingangsgrößen und Randbedingungen nutzbar zu sein. Auch die Anlage neu auftretender Prozesse zur Erweiterung der Datenbasis ist über eine einfache Eingabemaske möglich.

Ergebnis

Das Ergebnis der vorliegenden Arbeit ist ein Prozessmodell zur fundierten Entscheidungsunterstützung. Es werden dem Nutzer in einer außerplanmäßigen Situation umgehend mögliche und sinnvolle, zum aktuellen Leitprozess ausführbare Parallelprozesse vorgeschlagen, damit dieser unter den gegebenen Bedingungen und unter Berücksichtigung des aktuellen Projektfortschritts - bezogen auf die Gesamtprozessproduktivität - eine sinnvolle Umstellung der Prozessabfolge einleiten kann.

9.2 Ausblick

Die Weiterentwicklung des Prozessmodells ist in verschiedene Richtungen denkbar. Die verwendeten Daten sind zu verfeinern und die Prozessschwankungen, insbesondere die Schwankungen der Prozessdauern sind eingehender zu untersuchen und im Modell zu berücksichtigen. Dies ist beispielweise durch den Einsatz probabilistischer Modelle möglich. Die Erfahrungsdaten sind durch den mehrmaligen Einsatz des Prozessmodells bei weiteren Projekten zu erhöhen. Zudem ist die Verknüpfung des Modells mit den Vortriebsmaschinen zur Erhöhung der Datenqualität anzustreben, das Modell selbst ist auszubauen und in weiteren EDV-Systemen umzusetzen. Außerdem ist die Adaption des Modells auf weitere Vortriebsarten oder ggf. auch auf andere Baubereiche erstrebenswert.

Verfeinerung der Daten und Wahrscheinlichkeitsberechnung

Die Schwankungsbereiche der einzelnen Prozesse sind anhand einer größeren Datenmenge aus dokumentierten Projekten zu untersuchen und können mit verschiedenen probabilistischen Modellen zukünftig im Prozessmodell berücksichtigt werden. Die ersten Untersuchungen haben bereits das Potential dieser Modelle angedeutet. Sobald eine aussagekräftige Datenbasis vorhanden ist, können anhand von Simulationen die Prozessdauern, die Eintrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Prozesse und somit deren Einfluss sowie ihre Fälligkeiten zunehmend genauer abgeschätzt und im Prozessmodell sowie bereits in der Planung berücksichtigt werden.

Anwendung Prozessmodell

In einem ersten Schritt ist das Prozessmodell durchgehend bei weiteren Tunnel- bzw. Rohrvortriebsprojekten anzuwenden und anhand der erhaltenen Daten zu aktualisieren. Die Informationen bzgl. der Prozessdauern, Fälligkeiten und Ressourcen sind in der ersten Anwendung des Prozessmodells grobe Werte aus nur einer geringen Anzahl vergleichbarer Projekte bzw. Abschätzungen des fachkundigen Baustellenpersonals. Diese Werte sind an weiteren Projekten fortwährend zu validieren, zu verfeinern und auszuweiten. Durch eine standardisierte und dauerhafte Dokumentation wird sich auf diese Weise kontinuierlich eine Datenbasis aufbauen lassen. Anhand dieser werden die Ergebnisse des Prozessmodells zunehmend genauer und die kontinuierliche Gesamtprozessoptimierung wird damit durch die Nutzung des Prozessmodells selbst fortgesetzt.

Verknüpfung mit Maschinenanlage

Die Verknüpfung des Prozessmodells mit dem System der Maschinenanlage zur automatischen Erfassung der Vortriebsparameter ist ein weiterer sinnvoller Schritt. In der ersten Anwendung des Prozessmodells sind die Angabe bzgl. der Vortriebsdauer und Vortriebsstrecke manuell einzutragen, was einen erheblichen Aufwand bedeutet. Die Verknüpfung mit der Maschinenanlage verspricht neben der Zeit- und Aufwandseinsparung zudem eine Erhöhung der Datenqualität.

Umsetzung in weitere EDV-Systeme

Die ersten praktischen Anwendungen und Reaktionen der Nutzer (insb. Bauleiter) haben gezeigt, dass das Prozessmodell das Potential hat auf Dauer angewendet zu werden und dem verantwortlichen Personal auf der Baustelle als Entscheidungshilfe dienen zu können. Die intuitive Modelloberfläche, welche bisher nur als Desktopversion stationär (Baucontainer) nutzbar ist, ist in einem nächsten Schritt in weitere und anwenderfreundlichere EDV-Systeme zu übertragen. Die Absicht das Prozessmodell möglichst schnell in eine Smartphone- und Tablet-Applikation (App) zu überführen, wurde bereits von Verantwortlichen der *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG* bekundet.

Anwendung alternative Vortriebsart

Das Prozessmodell wurde so konzipiert, dass es nicht nur auf den Rohrvortrieb anwendbar, sondern auch mit geringem Aufwand auf andere Vortriebsarten adaptierbar ist. Diese Möglichkeit sollte für verschiedene Vortriebsarten in Betracht gezogen werden. Auch eine Anpassung des Prozessmodells auf andere Projektarten, wie bspw. den Hochbau, zur Nutzung dieses Hilfsmittels für die Optimierung der Produktivität in diesem Bereich, ist denkbar.

Literaturverzeichnis

A

Ahrlrichs & Knuppertz (2010)

Ahrlrichs, F.; Knuppertz, T.: *Controlling von Geschäftsprozessen*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag.

Arbulu et al. (2003)

Arbulu, R.; Tommelein, I.; Walsh, K., Hershauer, J.: *Value stream analysis of a re-engineered construction supply chain*. In: Building Research & Information 31 (2), S.161-171.

B

Backhaus (2018)

Backhaus, J.: *Digitale Optimierung der Bauplanung*. In: Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen. Fachkongress der wissenschaftlichen Mitarbeiter. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig.

Ballard (2000 (1))

Ballard, G.: *Lean Project Delivery System*. In: LCI White paper-8. Arlington: LCI.

Ballard (2000 (2))

Ballard, G.: *The Last Planner System of production control*. Birmingham: The University of Birmingham.

Ballard (2016)

Ballard, G.: *Last Planner - Treffen Regionale Praxisgruppe GLCI Frankfurt*. Frankfurt.

Bauer (2007)

Bauer, H.: *Baubetrieb*. Berlin: Springer Verlag.

Behrends (2013 (1))

Behrends, E.: *Markovprozesse und stochastische Differentialgleichungen*. Wiesbaden: Springer Verlag.

Behrends (2013 (2))

Behrends, E.: *Elementare Stochastik*. Wiesbaden: Springer Verlag.

Berekoven (1986)

Berekoven, L.: *Grundlagen der Absatzwirtschaft*. Berlin: Herne Verlag, Verlag Neue Wirtschaftsbriefe.

Berner et al. (2007)

Berner, F.; Kochendörfer, B.; Schach, R.: *Grundlagen der Baubetriebslehre 1 - Baubetriebswirtschaft*. Wiesbaden: Teubner Verlag.

Berner et al. (2008)

Berner, F.; Kochendörfer, B.; Schach, R.: *Grundlagen der Baubetriebslehre 2 - Baubetriebsplanung*. Wiesbaden: Teubner Verlag.

Binninger & Wolfbeiß (2018)

Binninger, M.; Wolfbeiß, O.: *Taktplanung und Taktsteuerung bei weisenburger*, In: *Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. München: Springer Gabler Verlag.

Bitzka (2018)

Bitzka, T.: *Lean Management im Tunnelbau. Untersuchungen mit probabilistischen Variablen*. Bachelorarbeit am Institut für Baubetrieb der Universität der Bundeswehr München. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Bregenhorn (2015)

Bregenhorn, T.: *Bauproduktionsplanung und -steuerung nach den Prinzipien des Lean Managements im Spezialfall Erdbau*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Burrows (2015)

Burrows, M.: *Kanban - Verstehen, einführen, anwenden*. Heidelberg: dpunkt.verlag.

C**Conrads et al. (2017)**

Conrads, A.; Thewes, M.; Scheffer, M.; König, M.: *Prozesssimulation für die Leistungsermittlung und -planung beim maschinellen Tunnelbau*. In: *Taschenbuch für den Tunnelbau 2017*, S.166 - 198. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Corsten (1996)

Corsten, H.: *Grundlagen und Elemente des Prozessmanagement*. In: *Schriften zum Produktionsmanagement Nr.4*. Kaiserslautern. Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Produktionswirtschaft.

Cottin & Döhler (2013)

Cottin, C.; Döhler, S.: *Risikoanalyse*. Wiesbaden: Springer Fachmedien.

Czado & Schmidt (2011)

Czado, C.; Schmidt, T.: *Mathematische Statistik*. Berlin: Springer Verlag.

D**Daenzer (1976)**

Daenzer, W. F.: *System Engineering - Leitfaden zur methodischen Durchführung umfangreicher Planungsvorhaben*. Köln: Peter Hanstein Verlag.

Dang et al. (2018)

Dang, T. T.; Schoesser, B.; Thewes, M.; Koenig, M: *Evaluation of productivities influenced by disturbances and different soil compositions in microtunneling using process simulation*. In: Tunneling and Underground Space Technology 76 (2018) 10-20, Oxford: Elsevier.

Darrington & Lichtig (2018)

Darrington, J.; Lichtig, W.: *Integrated Project Delivery – Angleichen der Ziele einer Projektorganisation, des operationalen Systems und der Commercial Terms*. In: Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. München: Springer Gabler Verlag.

Davenport (1993)

Davenport, T. H.: *Process Innovation - Reengineering Work through Information Technology*. Boston: Ernst & Young.

Demir & Theis (2018)

Demir, S.-T.; Theis, P.: *Lean Construction Management (LCM)*. In: Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen. München: Springer Gabler Verlag.

Dickmann (2015)

Dickmann, P.: *Schlanker Materialfluss - mit Lean Production, Kanban und Innovationen*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

DIN 6385 (2016)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN EN ISO 6385. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 69900 (2009)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 69900. Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 69901-1 (2009)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 69901-1. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 1: Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 69901-2 (2009)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 69901-2. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 2: Prozesse, Prozessmodell*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 69901-3 (2009)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 69901-3. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 3: Methoden*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 69901-4 (2009)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 69901-4. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 4: Daten, Datenmodell*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 69901-5 (2009)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN 69901-5. Projektmanagement - Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 9000 (2015)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN EN ISO 9000:2015-11. Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag.

DIN 9001 (2015)

Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): *DIN EN ISO 9001. Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. Berlin: Beuth Verlag.

Domschke & Drexl (2011)

Domschke, W.; Drexl, A.: *Einführung in Operations Research*. Darmstadt, Kiel: Springer Verlag.

E**Engelhardt (2016)**

Engelhardt, S. (2016). Skript zur Vorlesung Tunnelbau, Baubetriebliche Fragestellungen im konventionellen Tunnelbau, Universität der Bundeswehr München. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Engelhardt et al. (2018)

Engelhardt, S.; Kicherer, M.; Reiter, M.: *LEAN-Ansätze im konventionellen Tunnelbau*. In: Tagungsband zum 6. Münchener Tunnelbausymposium. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München.

F**Ferstl & Sinz (2013)**

Ferstl, O.; Sinz, E.: *Grundlagen der Wirtschaftsinformatik*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Fiedler (2018)

Fiedler, M.: *Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. München: Springer Gabler Verlag.

Fiedler et al. (2018)

Fiedler, M.; Dlouhy, J.; Binninger, M.: *Der Lean Ansatz im Hinblick auf die Baubranche*. In: *Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. München: Springer Gabler Verlag.

Finke (2005)

Finke, R.: *Grundlagen des Risikomanagements*. Weinheim: Wiley Verlag.

Fischer (2008)

Fischer, F.: *Projektmanagement* In: Berufsbegleitender Internetgestützter Bachelor-Studiengang Business Administration. Oldenburg.

Fishman (1996)

Fishman, G.: *Monte Carlo - Concepts, Algorithms and Application*. New-York (USA): Springer Verlag.

Frandsen et al. (2013)

Frandsen, A.; Berghede, K.; Tommelein, I.: *Takt time planning for construction of exterior cladding (Proc. 21st Annual Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction, (IGLC21))*. Fortaleza, Brazil: IGLC.

Frese et al. (2012)

Frese, E.; Graumann, M.; Theuvsen, L.: *Grundlagen der Organisation - Entscheidungsorientiertes Konzept der Organisationsgestaltung*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Friedrich et al. (2013)

Friedrich, T.; Meijnen, P.; Schriewersmann, F.: *Lean Construction - die Übertragung der Erfolgsmodelle aus der Automobilindustrie*. In: Praxis des Bauprozessmanagements. Termine, Kosten und Qualität zuverlässig steuern. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

G**Gadatsch (2012)**

Gadatsch, A.: *Grundkurs Geschäftsprozess-Management*. Niederkassel: Springer Vieweg Verlag.

Gehbauer (2011)

Gehbauer, F.: *Lean Management im Bauwesen - Grundlagen. Skript am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

Gehbauer (2014)

Gehbauer, F.: *Lean Management im Bauwesen, Skript am Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Karlsruher Institut für Technologie*. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.

Girmscheid (2008)

Girmscheid, G.: *Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Girmscheid (2010)

Girmscheid, G.: *Strategisches Bauunternehmensmanagement - Prozessorientiertes integriertes Management für Unternehmen in der Bauwirtschaft*. Zürich: Springer Verlag.

Girmscheid (2014)

Girmscheid, G.: *Bauunternehmensmanagement - prozessorientiert Band 1 - Strategische Managementprozesse*. Zürich: Springer Vieweg.

Girmscheid & Busch (2008)

Girmscheid, G.; Busch, T.: *Projektrisikomanagement in der Bauwirtschaft*. Berlin: Bauwerk Verlag.

Gleissner (2008)

Gleissner, W.: *Grundlagen des Risikomanagements*. München: Verlag Franz Vahlen.

Gleißmann (2018)

Gleißmann, L.: *Lean Management im Tunnelbau - Anwendung von Lean Management-Methoden auf den konventionellen Tunnelbau; Entwicklung einer Entscheidungsunterstützung*. Masterarbeit am Institut für Baubetrieb der Universität der Bundeswehr München. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Goldratt & Cox (2013)

Goldratt, E., Cox, J.: *Das Ziel*. Frankfurt: Campus Verlag GmbH.

Grabner (2017)

Grabner, T.: *Operations Management - Auftragserfüllung bei Sach- und Dienstleistungen*. Wiesbaden: Springer Gabler Verlag.

Gralla (2011)

Gralla, M.: *Baubetriebslehr Bauprozessmanagement*. Köln, Werner Verlag.

Greiner et al. (2005)

Greiner, P., Mayer, P., Stark, K.: *Baubetriebslehre - Projektmanagement - Wie Bauprojekte erfolgreich gesteuert werden*. Wiesbaden: Vieweg Verlag.

Günther & Tempelmeier (2016)

Günther, H.-O., Tempelmeier, H.: *Produktion und Logistik - Supply Chain und Operations Management*. Norderstedt: BoD - Books on Demand.

Gutenberg (1976)

Gutenberg, E.: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre*. Berlin: Springer Verlag.

H**Haberfellner et al. (2015)**

Haberfellner, R.; Weck, O. d.; Fricke, E.; Vössner, S.: *Systems Engineering - Grundlagen und Anwendung*. Zürich: Orell Füssli Verlag.

Haghsheno (2016)

Haghsheno, S.: *Baubetrieb - Bauprozessmanagement*. In: Schneider Bautabellen für Ingenieure, 22.Auflage. Köln: Bundesanzeiger Verlag.

Haghsheno (2018)

Haghsheno, S.: *Vorwort* In: *Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. München: Springer Gabler Verlag.

Haghsheno et al. (2015)

Haghsheno, S.; Binninger, M.; Dlouhy, J.: *Wertschöpfungsorientierte Planung und Realisierung von Bauvorhaben durch Lean Construction*. In: *Bauingenieur*. S. V. Verlag.

Hahn (1996)

Hahn, B.: *Erfolgsfaktor Managementpotential - Bewältigung von Wandlungsprozessen durch strategieorientierte Führungskräfteplanung*. Wiesbaden: Springer Verlag.

Händler (2018)

Händler, A.: *Bauzeitschätzung in den frühen Planungsphasen anhand projektspezifischer Referenzgebäude*. In: *Tagungsband zum 29. BBB-Assistententreffen*. Braunschweig: Zentrum für Bau- und Infrastrukturmanagement.

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (2018)

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie: *Fachkräftemangel*. Zugegriffen: 15.12.2018 von https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/fachkraefte-mangel_bwz/.

Heidemann (2010)

Heidemann, A.: *Kooperative Projektentwicklung im Bauwesen unter der Berücksichtigung von Lean-Prinzipien - Entwicklung eines Lean-Projektentwicklungssystems*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Heil (1995)

Heil, M.: *Entstörung betrieblicher Abläufe*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Hengartner & Theodorescu (1978)

Hengartner, W.; Theodorescu, R.: *Einführung in die Monte-Carlo-Methode*. München: Hanser Verlag.

Herrenknecht (2018)

Herrenknecht. *Glossar*. Zugegriffen: 16.11.2018 von <https://www.herrenknecht.com/de/funktionen/glossar.html>.

Heß (1995)

Heß, M.: *TQM/Kaizen - Praxisbuch*. Köln: Verlag TÜV Rheinland.

Hickethier (2015)

Hickethier, G.: *Communication Structures in the Design Phase of Lean Project Delivery*. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Hildenbrand (1988)

Hildenbrand, K.: *Systemorientierte Risikoanalyse in der Investitionsplanung*. Dissertation an der Universität Hohenheim. Berlin: Dunker & Humblot.

Hill (2012)

Hill, P.: *Simulative Risikoanalyse von Biomethanprojekten - Ein operativer Ansatz zur Implementierung simulativer Risikoanalysen in das Risikomanagementsystem von Investoren eines Biomethanprojektes*. Dissertation an der Universität Kassel. Kassel.

Howell & Ballard (1994)

Howell, G.; Ballard, G.: *Stabilizing Work Flow*. Proceedings of the 2nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Santiago, Chile: Alarcón.

I**Imai (1993)**

Imai, M.: *Kaizen - Der Schlüssel zum Erfolg der Japaner im Wettbewerb*. Berlin: Ullstein GmbH.

J**Johnen (2017)**

Johnen, D.H.: *Prozessorientierte Bewertung und Sicherung der Qualität nachhaltiger Immobilienprojekte - Entwicklung eines Referenzmodells zum prozessorientierten Controlling nachhaltiger Immobilien-Entwicklungsprozesse auf der Basis von Quality Gates*. München: Verlag Dr. Hut.

K**Kaiser (2013)**

Kaiser, J.: *Lean Process Management in der operativen Bauabwicklung*. Darmstadt: Institut für Baubetrieb der Technischen Universität Darmstadt.

Kaizen Institut (2016)

Kaizen Institut: *kaizen.com*. Zugegriffen: 13.2.2016 von <https://de.kaizen.com/wissenscenter/glossar.html>.

Kirsch (2009)

Kirsch, J.: *Organisation der Bauproduktion nach dem Vorbild industrieller Produktionssysteme - Entwicklung eines Gestaltungsmodells eines Ganzheitlichen Produktionssystems für den Bauunternehmer*. Karlsruhe: Institut für Technologie und Management im Baubetrieb (KIT).

Kitzmann & Brenk (2018)

Kitzmann, Q.; Brenk, W.: *Entwicklung von Lean Management hin zu Lean Construction*. In: *Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. München: Springer Gabler Verlag.

Kletti & Schumacher (2011)

Kletti, J.; Schumacher, J.: *Die perfekte Produktion*. Heidelberg: Springer Verlag.

Knoche et al. (2002)

Knoche, I.; Knoche, N.; Krallmann, M.; Krallmann, B.: *Stochastik - Beschreibende Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie*. Mannheim: Dudenverlag.

Kochendörfer et al. (2010)

Kochendörfer, B.; Liebchen, J.; Viring, M.: *Bau-Projekt-Management - Grundlagen und Vorgehensweisen*. Wiesbaden: Vieweg Teubner Fachverlag.

Korndörfer & Wittenbrink (2018)

Korndörfer, C.; Wittenbrink, P.: *Optimierung von Rohrvortrieben mit Methoden des Lean Construction Managements Anwendungen bei einem Abwassertransportziel in der Hamburger Altstadt*. In: Tagungsband zum 6. Münchener Tunnelbausymposium. Neubiberg: Universität der Bundeswehr München.

Kolymbas (1998)

Kolymbas, D.: *Geotechnik - Tunnelbau und Tunnelmechanik*. Innsbruck: Springer Verlag.

Koskela (1992)

Koskela, L.: *Application of the new production philosophy to construction*. Stanford, CA: Center for Integrated Facility Engineering.

Koskela (2000)

Koskela, L.: *An exploration towards a production theory and its application to construction*. Espoo, Finland: VTT Technical Research Centre of Finland.

Kraatz (2015)

Kraatz, S.: *Privates Baurecht*. In: Baubetrieb Praxis kompakt. Berlin: Beuth Verlag.

Krallmann et al. (2013)

Krallmann, H.; Bobrik, A.; Levina, O.: *Systemanalyse im Unternehmen: Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik*. München: Oldenbourg Verlag.

L**Lange (2017)**

Lange, S.: *Die Organisation einer flussorientierten Baulogistik für den Ausbau*. Stuttgart: Institut für Baubetriebslehre der Universität Stuttgart.

Langemann (1999)

Langemann, T.: *Modellierung als Kernfunktion einer systemorientierten Analyse und Bewertung der diskreten Produktion*. Paderborn: Universität-GH Paderborn.

Lean.org (2016)

lean.org: Zugegriffen: 06.10.2016 von <http://www.lean.org/WhatsLean/Timeline.cfm>.

Leimböck et al. (2005)

Leimböck, E.; Iding, A.; Meinen, H.: *Bauwirtschaft - Grundlagen und Methoden*. Dortmund: Teubner Verlag.

Leimböck et al. (2017)

Leimböck, E.; Iding, A.; Meinen, H.: *Bauwirtschaft - Grundlagen und Methoden*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

M**Maidl et al. (1997)**

Maidl, B.; Jodl, H.G.; Schmidt, L.R.; Petri, P.: *Tunnelbau im Sprengvortrieb*. Berlin: Springer-Verlag.

Maidl (2004 (1))

Maidl, B.: *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus - Band I: Konstruktion und Verfahren*. Essen: Verlag Glückauf Essen.

Maidl (2004 (2))

Maidl, B.: *Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus - Band II: Grundlagen und Zusatzleistungen für Planung und Ausführung*. Essen: Verlag Glückauf Essen.

Maidl et al. (2011)

Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Maidl, U.; Wehrmeyer, G.: *Maschinelles Tunnelbau im Schildvortrieb*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Maidl et al. (2014 (1))

Maidl, B.; Thewes, M.; Maidl, U.: *Handbook of Tunnel Engineering I - Structures and Methods*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Maidl et al. (2014 (2))

Maidl, B.; Thewes, M.; Maidl, U.: *Handbook of Tunnel Engineering II - Basics and Additional Services for Design and Construction*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Maidl & Stascheit (2014)

Maidl, U.; Stascheit, J.: *Real time process controlling for EPB shields. – Echtzeit-Prozesscontrolling bei Erddruckschilden*. In: *Geomechanics and Tunnelling 7*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

Mossman (2013)

Mossman, A.: *Last Planner, 5+1 crucial & collaborative conversations for predictable design & construction delivery*. Zugegriffen: 26.01.2017 von <http://www.leanconstruction.org/media/docs/Mossman-Last-Planner>.

Motzko (2013)

Motzko, C.: *Praxis des Bauprozessmanagements - Termine, Kosten und Qualität zuverlässig steuern*. Darmstadt: Ernst & Sohn Verlag.

N**Nußbaumer (1988)**

Nußbaumer, M.: *Vorpressen von Großrohren und dessen Grenzen*. In: *Forschung + Praxis* 32. S.55-61.

O**Ohno (1993)**

Ohno, T.: *Das Toyota-Produktionssystem*. Frankfurt a.M.; New York: Campus Verlag.

P**Pandit & Naik (2016)**

Pandit, S.; Naik, G.: *Application of theory of constraints on scheduling of drum-buffer-ropes system*. Jaysingpur: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.

Pfohl (2018)

Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme - Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. Darmstadt: Springer.

PMI (2008)

Project Management Institute: *A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide)*. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.

Praetorius & Schößer (2018)

Praetorius, S.; Schößer, B.: *Bentonithandbuch - Ringschmierung für den Rohrvortrieb*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.

R**Rauh et al. (2007)**

Rauh, S.; Berenz, S.; Heißenhuber, A.: *Abschätzung des Unternehmerischen Risikos beim Betrieb einer Biogasanlage mit Hilfe der Monte-Carlo-Methode*. In: *Konferenzbeitrag der GEWISOLA und ÖGA*. Freising.

Rein & Schmidt (2018)

Rein, S., Schmidt, C.: *Regionale Entwicklungstendenzen in Zeiten einer regen Baukonjunktur*. In: *BBSR-Analyse Kompakt*. Bundesinstitut für Bau-, Stdt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Bonn.

Ropohl (2012)

Ropohl, G.: *Allgemeine Systemtheorie - Einführung in transdisziplinäres Denken*. Berlin: edition sigma.

Rother & Shook (2011)

Rother, M.; Shook, J.: *Sehen lernen - mit Wertstromdesign die Wertschöpfung erhöhen und Verschwendung beseitigen*. Mühlheim: Lean Management Institut GmbH.

Rudloff (2010)

Rudloff, R.: *Modul- und Prozessmodell zur Lebenszyklusrenditeberechnung eines Bauwerkes*. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München: Dr. Hut Verlag.

S**Sandoval-Wong (2012)**

Sandoval-Wong, J.: *Development of a risk based decision analysis system for project management in construction projects*. Dissertation an der Universität der Bundeswehr München. München: Dr. Hut Verlag.

Schneeweiss (1969)

Schneeweiss, H.: *Monte-Carlo-Methode*. In: Beiträge zur Unternehmensforschung. S.129-152. Würzburg: Physica Verlag.

Scholz et al. (2003)

Scholz, O.; Korge, A.; Schlauß, S.: *Was ein Produktionssystem ausmacht*. In: Ganzheitlich produzieren - Innovative Organisation und Führung. Stuttgart: LOG_X Verlag.

Schröder (2017)

Schröder, J.: <http://werte-schoepfen.de>. Zugegriffen: 06.11.2017 von <http://werte-schoepfen.de/index.php/wertschoepfung-in-unternehmen/produktionsnivellierung>.

Schuh (2013)

Schuh, G.: *Lean Innovation*. Aachen: Springer Vieweg Verlag.

Schwarz (2014)

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz (2016 (3))

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 3: Spritzbeton. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz (2016 (5))

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 5: Schuttern. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz (2016 (6))

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 6: Bewetterung. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz (2016 (8))

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 8: Tunnelvortriebsmaschinen TVM. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz (2017 (1))

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 1: Grundlagen. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz (2017 (4))

Schwarz, J.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 4: Mechanischer Ausbruch. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz & Engelhard (2016 (2))

Schwarz, J.; Engelhardt, S.: *Tunnelbau - Skript zur Vorlesung Tunnelbau. Teil 2: Tunnelausbruch / Sprengvortrieb. Universität der Bundeswehr München*. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz & Engelhard (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, S. 243 - 253. Neubiberg: Institut für Baubetrieb.

Schwarz & Wittenbrink (2018)

Schwarz, J.; Wittenbrink, P.: *Prozessmodell zur Optimierung des Rohrvortriebs mit Lean Construction Methoden*. In: Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Andreas Kropik im Rahmen der 10. Wiener Gespräche. TU Wien. Wien: Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement.

Smith (1974)

Smith, A.: *Der Wohlstand der Nationen*. München: Verlag C.H. Beck.

Sonntag & Hickethier (2018)

Sonntag, G.; Hickethier, G.: *Vertragliche Umsetzung von Lean Construction in Deutschland*. In: *Lean Construction - Das Managementhandbuch, Agile Methoden und Lean Management im Bauwesen*. München: Springer Gabler Verlag.

Stachowiak (1973)

Stachowiak, H.: *Allgemeine Modelltheorie*. Wien: Springer Verlag.

Statista (2018 (1))

Statista. Statistisches Bundesamt: *Entwicklung des Bauvolumens in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2017*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167953/umfrage/bauvolumen-in-deutschland-seit-2008/>. Zugegriffen: 02.11.2018.

Statista (2018 (2))

Statista. Statistisches Bundesamt: *Umsatz im Baugewerbe in Deutschland in den Jahren 2008 bis 2016 (in Milliarden Euro)*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/252167/umfrage/umsatz-im-baugewerbe-in-deutschland/>. Zugegriffen: 02.11.2018.

Statista (2018 (3))

Statista. Statistisches Bundesamt: *Index zum Auftragseingang im Tiefbau in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2017 (2010 = Index 100)*.

URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/254914/umfrage/auftragseingang-im-tiefbau-in-deutschland/>. Zugegriffen: 02.11.2018.

Staudt et al. (1985)

Staudt, E.; Groeters, U.; Hafkesbrink, J.; Treichel, H.-R.: *Kennzahlen und Kennzahlensysteme*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Steiger (2009)

Steiger, M.: *IT-gestütztes Risikomanagementmodell für Tunnelbauprojekte mit Hilfe von Bayes'schen Netzen und Monte-Carlo-Simulationen*. Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich (CH): ETH Zürich.

Stern et al. (2018)

Stern, S.; Strube, G.; Lotz, C.; Kutz, A.: *Infrastruktur und Wohnen - Deutsche Ausbauziele in Gefahr*. In: McKinsey&Company. Infrastruktur & Wohnen. Deutsche Ausbauziele in Gefahr. URL: <https://www.mckinsey.de/Deutsche-Ausbauziele-in-Gefahr>.

Zugegriffen/ Download: 20.03.2018

Suzaki (1989)

Suzaki, K.: *Modernes Management im Produktionsbetrieb*. München, Wien: Carl Hanser Verlag München Wien.

T**TBM (2016)**

TBM Consulting Group: <http://www.tbmcg.de/resource-center/lean-sigma-glossary-terms.html>. Zugegriffen am 05.10.2016.

Thewes & Conrads (2017)

Thewes, M.; Conrads, A.: *Prozesssimulation für maschinelle Tunnelvortriebe - Leistungsanalyse unter Berücksichtigung von Logistik, Wartung und Störungen*. In: Kolloquium Maschinelle Vortriebe am 18.05.2017. Zürich: ETH Zürich.

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. S.507 - 523. München: Dr. Hut Verlag.

Thommen et al. (2017)

Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.; Gilbert, D.; Hachmeister, D.; Kaiser, G.: *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre - Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Trier et al. (2013)

Trier, M.; Bobrik, A.; Neumann, N.; Wyssussek, B.: *Systemtheorie und Modell*. In: Systemanalyse im Unternehmen - Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik. Krallmann, H.; Bobrik, A.; Levina, O. München: Oldenburg Verlag.

U**Ullrich et al. (2013)**

Ullrich, A.; Sembritzki, U.; Skupsch, K.: *Störungsmanagement im saisonalen Umfeld*. Ein interdisziplinärer Ansatz zur Lösungsgenerierung. In: Productivity Management (5), S.45-48.

V**VDI (2018)**

Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 3633 - Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen Grundlagen*. Berlin: Beuth Verlag.

VDI (2017)

Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinie 2871 - Blatt 1: Ganzheitliche Produktionssysteme - Führung; Lean production systems - Lean leadership*. Berlin: Beuth Verlag.

Vocke (2016)

Vocke, B.: *Organisation von Planung und Bauausführung – Integrale Leistungsbilder für Organisationsplanung, Projektsteuerung und Projektleitung*. Dissertation an der Technischen Universität München. München: Technische Universität München.

Vygen et al. (1994)

Vygen, K.; Schubert, E.; Lang, A.: *Bauverzögerung und Leistungsänderung - Rechtliche und baubetriebliche Probleme und ihre Lösungen*. Wiesbaden: Bauverlag.

Vygen et al. (1998)

Vygen, K.; Schubert, E.; Lang, A.: *Bauverzögerung und Leistungsänderung - Rechtliche und baubetriebliche Probleme und ihre Lösungen*. Wiesbaden: Bauverlag.

W**Wasemann (2017)**

Wasemann, H.: *Optimierung von Produktionsprozessen nach LEAN-Prinzipien unter Berücksichtigung von Störungen Lösungen*. Bachelorarbeit am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg – Hamburg. Hamburg: Institut für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg – Hamburg.

Weig (2008)

Weig, S.: *Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten*. Dissertation an der Technischen Universität München. München: Technische Universität München.

Weiß et al. (2015)

Weiß, E.; Strubl, C.; Goschy, W.: *Lean Management - Grundlagen der Führung und Organisation lernender Unternehmen*. Berlin: Erich Schmidt Verlag.

Werner (2010)

Werner, H.: *Supply Chain Management*. Wiesbaden: Gabler Verlag.

Wiedemann (2005)

Wiedemann, M.: *Risikomanagement bei der Immobilien-Projektentwicklung unter Berücksichtigung der Risikoanalyse und Risikoquantifizierung*. Dissertation an der Universität Leipzig. Leipzig: Universität Leipzig.

Wikipedia (2016)

Wikipedia.de. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Mitsubishi>. Zugegriffen: 06.10.2016.

Witt & Witt (2015)

Witt, J.; Witt, T.: *Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess (KVP)*. Hamburg: Windmühle Verlag.

Womack & Jones (1991)

Womack, J.; Jones, D.: *Die zweite Revolution in der Autoindustrie*. Frankfurt/New York: Campus Verlag.

Womack & Jones (2013)

Womack, J.; Jones, D.: *Lean Thinking, Ballast abwerfen, Unternehmensgewinne steigern*. Frankfurt am Main/New York: Campus Verlag.

Z**ZDB (2018)**

Zentralverband Deutsches Baugewerbe: *Baumarkt 2017 - Perspektive 2018*. Berlin: Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V.

Zilch et al. (2013)

Zilch, K.; Diederichs, C. J.; Katzenbach, R.; Beckmann, K.: *Bauwirtschaft und Baubetrieb*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg Verlag.

Zimmermann (2011)

Zimmermann, J.: *Kybernetik der Planungsprozesse, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung am*. München: Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der TU München.

Zollondz (2013)

Zollondz, H.-D.: *Grundlagen Lean Management*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Anlagen

Anlage 1: Anhang zum Prozessmodell.....	231
Anlage 1.1: Verwendete Formeln.....	231
Anlage 1.2: Normierung Skala Fälligkeiten	234
Anlage 2: Prozessmodell	235
Anlage 2.1: Prozessmodell Seite Startseite	235
Anlage 2.2: Prozessmodell Seite Prozesse.....	236
Anlage 2.3: Prozessmodell Seite Prozessanlage.....	238
Anlage 3: Maschinenauswertung / Schichtprotokoll (beispielhafter Auszug)	239
Anlage 4: Projektbericht.....	241
Anlage 5: Stillstandauswertung.....	243
Anlage 6: 7-W-Methode (5W2H-Methode).....	244

Anlage 1: Anhang zum Prozessmodell**Anlage 1.1: Verwendete Formeln****(Formel 1) Theoretische Kapazität K_t und (Formel 2) nutzbare Kapazität K_n :**

$$K_t = P * z$$

$$K_n = P * z * e$$

K_t	=	theoretische Kapazität
P	=	Potential
z	=	Zeit (Einsatzzeit)
K_n	=	nutzbare Kapazität
e	=	Potentialnutzungsfaktor

(Formel 3) Produktivität:

$$\text{Produktivität} = \frac{\text{Arbeitsergebnis}}{\text{Einsatzmenge an Produktionsfaktoren}}$$

Allgemeines Optimierungsmodell (Formel 4 - 3 Formeln):Maximiere (oder Minimiere) (4.1)

$$z = F(x)$$

Unter den Nebenbedingungen (4.2)

$$g_i(x) \begin{cases} \geq \\ = \\ \leq \end{cases} 0 \text{ für } i = 1, \dots, m$$

(4.3)

$$x \in W_1 * W_2 * \dots * W_n, \quad W_j \in \{\mathbb{R}_+, \mathbb{Z}_+, B\}, j = 1, \dots, n$$

 x ein Variablenvektor mit n Komponenten x_1, \dots, x_n $F(x)$ eine Zielfunktion $x_j \in \mathbb{R}_+$ Nichtnegativitätsbedingung (kontinuierliche Variable) $x_j \in \mathbb{Z}_+$ Ganzzahligkeitsbedingung (ganzzahlige Variable) $x_j \in B$ Binärbedingung (binäre Variable)**Optimierungsproblem im Rohrvortrieb (Formel 5 - 3 Formeln):**

Maximiere (5.1)

$$F(x) = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Unter den Nebenbedingungen (5.2) und (5.3)

$$\sum_{j=1}^n w_j x_j \leq b \quad x_j \in \{0,1\} \text{ für } j = 1, \dots, n$$

(Formel 6) Taktzeit bzgl. des Kundenbedarfs:

$$Taktzeit = \frac{Nettoarbeitszeit}{Kundenbedarf}$$

(Formel 7) Berechnung SA [m] in Abhängigkeit vom Vortriebsort:

$$SA_o = SF - AO + LD \quad [m]$$

SA _o	=	Spätester Ausführungsbeginn [m]
SF	=	Tunnelmeter bis Wiederholung / Späteste Fälligkeit [m]
AO	=	Aktueller Ort [m]
LD	=	Ort der letzten Durchführung [m]

(Formel 10) Berechnung SA [min] in Abhängigkeit der Vortriebsdauer:

$$SA_T = SF - VD_{pt} + LD \quad [min]$$

SA _T	=	Spätester Ausführungsbeginn [min]
SF	=	Dauer bis Wiederholung / Späteste erneute Fälligkeit [min]
VD _{pt}	=	Produktive Vortriebsdauer im Zeitraum t [min]
LD	=	Zeitpunkt der letzten Durchführung [min]

(Formel 8) Berechnung der Fälligkeit [%] in Abhängigkeit vom Vortriebsort:

$$F = SA * \frac{100}{SF} \quad [%]$$

F	=	Fälligkeit [%]
SA _o /SA _T	=	Spätester Ausführungsbeginn [m] / [min]
SF	=	Tunnelmeter bis Wiederholung / Späteste Fälligkeit [m]

(Formel 11) Berechnung der Produktiven Vortriebsdauer:

$$VD_{pt} = (AT_t - 1) * Ah * 60 - SZ_t + VD_a$$

VD_{pt}	=	Produktive Vortriebsdauer im Zeitraum t [min]
t	=	Zeitraum Auswertung (Projektbeginn bis aktuell) [min]
AT_t	=	Arbeitstage im Zeitraum t [T]
SZ_t	=	Summe Stillstandzeiten [min]
Ah	=	tägliche Arbeitszeit [h/T]
VD_a	=	(heutige) aktuelle Vortriebsdauer [min]

(Formel 12) Berechnung der Arbeitstage im Zeitraum t:

$$AT_t = T_t * \left(\frac{AT_w}{7}\right) - FT_t$$

T_t	=	Anzahl Tage im Zeitraum t [T]
FT_t	=	Anzahl Feiertage im Zeitraum t [T]
AT_w	=	Anzahl Arbeitstage pro Woche [T]

(Formel 9) Berechnung der Wahrscheinlichkeit Fertigstellung des Parallelprozesses:

$$Dauer_{Leitprozess} - Dauer_{Parallelprozess} \geq 0$$

Anlage 1.2: Normierung Skala Fälligkeiten

F = Fälligkeit [%]

SA = Spätester Ausführungsbeginn [m]

SF = Tunnelmeter bis Wiederholung / Späteste Fälligkeit [m]

Normierung der Fälligkeit auf eine Normskala von 0 bis 10:

F [%]	< 1 %	1 bis 10 %	11 bis 20 %	21 bis 30 %	31 bis 40 %	41 bis 50 %	51 bis 60 %	61 bis 70 %	71 bis 80 %	81 bis 90 %	91 bis 100 %
Fälligkeit (normiert)	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0

Abb. 54: Normierung der Fälligkeit auf eine Normskala von 0 bis 10

Anlage 2: Prozessmodell

Anlage 2.1: Prozessmodell Seite Startseite

Datum		Heute		Haltung		Ressourcen								
01.01.2018		Name Haltung / Projekt		KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra			
				0	0	0	0	0	0	0	0			

Leitprozess															
Prozess wählen		Erwartete Dauer [min]		Tunnelfortschritt [m]		Arbeitsdauer [min]							Parallelprozess Suche starten		
#	Prozessbezeichnung / Prozessname			0		0		0							
KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	Ressourcenakzeptanz					Prozess dokumentieren		
0	0	0	0	0	0	0	0	+/- 0							

Parallelprozess(e)															
		Ressourcen													
Rang	P.-Nr.	Prozessname			KF	Schl	SchFü	Elek	SchFa	Sepa	Mech	Extra	E. Dauer [min]	Fähigkeit	Häufigkeit
1	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
2	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
3	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
4	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
5	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
6	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
7	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
8	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
9	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
10	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
11	-	-			-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0

Abb. 86: Beispiel Prozessmodell - Startseite leer

Die obige Abbildung zeigt die leere Benutzeroberfläche des Prozessmodells. In diese sind im Zuge der Arbeitsvorbereitung die Angaben in der ersten Zeile (Datum, Projektname, Ressourcen) einzutragen. Die Ressourcen, welche die verfügbaren Arbeitskräfte darstellen sind bei Änderungen zu aktualisieren. Eine Anpassung bzw. Erweiterung der Ressourcen auf Fähigkeiten des Personals, Maschinen oder weitere Arbeitskräfte ist mit relativ geringem Aufwand möglich. Dies allerdings nicht auf der Benutzeroberfläche, sondern durch Anpassungen im Bereich der Programmierung durch einen Systemadministrator.

Nach Initiierung des Modells sind der Tunnelfortschritt und die Arbeitsdauer zu aktualisieren bzw. lassen sich durch Verknüpfungen mit der Maschinenanlage automatisch aktualisieren. Sind diese Daten in das Prozessmodell eingegeben und ist deren Aktualität kontrolliert worden, ist die Nutzung des Prozessmodells möglich. Hierzu wird der jeweilige Leitprozess ausgewählt. Dies geschieht entweder über die Prozessnummer oder über die Prozessbezeichnung (Prozessname). Die erwartete Dauer und die notwendigen Ressourcen werden aus hinterlegten Daten automatisch ausgegeben. Die Dauer und auch für die Ressourcenakzeptanz (mehr oder weniger Ressourcen nötig bzw. verfügbar) kann manuell angepasst werden. Das Prozessmodell wird über den Button „Parallelprozess Suche starten“ gestartet und gibt automatisch mögliche und sinnvolle Parallelprozesse aus.

Wird der Leitprozess und einer bzw. mehrere dieser Parallelprozesse ausgeführt, lassen sie sich die für diese Prozesse hinterlegten Daten dokumentieren und aktualisieren (Button „Prozess dokumentieren“). Der nächste Leitprozess kann nachfolgend ausgewählt werden.

Anlage 2.2: Prozessmodell Seite Prozesse

(Filter 4) Prozess- nummer	Prozessbezeichnung	(Kriterium 1) Parallelitäts- möglichkeiten			(Kriterium 2) Ressourcen				(Kriterium 3) Prozessdauer [min]	(Filter 1) Fälligkeit (Zeit)	(Filter 2) Nachfolge- prozesse	(Filter 3) Häufigkeit	Letzte Durchf. (Ort)	Letzte Durchf. (Zeit)
		KF	SoH	SeSoH	Elek	SeSoH	Sega	Mech						
1	100	Vortrieb												
2	101	Ragelvortrieb	207.905.907.908	0,5	0	1	0	1	1	0	0	120	2	
3	102	Behälterfahren im VT-Stilstand	207.905.907.908	0,5	0	1	0	1	1	0	0	60	2	
4	103	Ausfahrvorgang	207.905.907.908	0,5	0	1	0	1	1	0	0	720	2	
5	104	Einfahrvorgang	207.905.907.908	0,5	0	1	0	1	1	0	0	720	2	
5	105	Hindemischleistung mittels Vortrieb	207.905.907.908	0,5	0	1	0	1	1	0	0	720	2	
6	106	Durchfahren Zwischenschacht	207.905.907.908	0,5	0	1	0	1	1	0	0	720	2	
7	200	Rohre inbau												
7	201	Rohre inbau	207.306.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	1	0	30	2	
8	202	Einbau DVR	207.306.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	1	0	60	2	
9	203	Einbau DMR	207.306.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	1	0	60	5	
10	204	Einbau Mischenerohr 1	207.306.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	1	0	240	5	
11	205	Einbau Mischenerohr 2	207.306.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	1	0	240	5	
12	206	Einbau Schleuse	207.306.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	1	0	240	5	
13	324	Bohr-Ausstattung	16.817.818.905.906.907.908	1	1	0	0	0	0	0	0	30	2	
300		Systemeingeordnete Ausfälligkeiten												
34	301	Förderbandlauf führen	207.307.308.906	0,5	0	1	0	1	1	0	0	10	4	
35	302	Kabelveränderung TBM	306.309.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	0	0	60	50	
36	303	Kabelveränderung Pumpe	306.309.314.315.905.908	1	1	1	0	1	0	0	0	60	50	
37	304	Kontrollvermessung	16.816.817.818.905.907.908	0,5	0	0	0	0	0	0	0	180	50	
38	305	Kontrollvermessung	16.816.817.818.905.907.908	0,5	0	0	0	0	0	0	0	180	50	
39	306	Auffüllen Metalleuk	15.816.817.818.905.907.908	0,5	0	0	0	0	0	0	0	15	50	
20	307	Auswechseln Vortriebspumpe Anfahrphase	21.306.314.315.316.317.318	0,5	1	0	0	0	0	1	0	30	10000	
21	308	Lösen Vortriebspumpe Anfahrphase	21.306.314.315.316.317.318	0,5	1	0	0	0	0	1	0	30	10000	
22	309	Umbau Deiner - Rohrleitungen	83.304.306.310.314.314.315	0,5	1	0	0	0	1	0	0	60	10000	
23	310	Einsteig in TBM - Bohrwerkzeuge - Inspektion - Planmäßig	15.816.817.818.905.907.908	0,5	1	0,5	1	0	1	0	0	120	10000	
24	311	Einsteig in TBM - Bohrwerkzeuge - Wechsel - planmäßig	15.816.817.818.905.907.908	0,5	1	0,5	1	0	1	0	0	240	10000	
400		Wartezellen												
37	401	Warten auf Vortriebspumpe	16.817.818.905.906.907.908	0	0	0	0	0	0	0	0	120	10000	
38	402	Warten auf Schmersuspension	16.817.818.905.906.907.908	0	0	0	0	0	0	0	0	30	10000	
39	403	Warten auf Ersatzteile und Servicepersonal	16.817.818.905.906.907.908	0	0	0	0	0	0	0	0	30	10000	
40	404	Warten auf Bodenabfuhr	16.817.818.905.906.907.908	0	0	0	0	0	0	0	0	30	10000	
41	405	Austausch Suspension Förderkreislau	11.316.317.318.905.907.908	0	0	0	0,5	1	0	0	0	30	10000	
42	406	Ein-/Ausschleusen	15.816.817.818.905.907.908	0,5	1	1	0,5	1	0	1	0	60	10000	
500		Betriebsstörungen / Reparatur TBM												
45	501	Betriebsstörung TBM - hydraulisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
46	502	Betriebsstörung TBM - elektrisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
47	503	Betriebsstörung TBM - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
48	504	Betriebsstörung Schneidrad - elektrisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
49	505	Betriebsstörung Schneidrad - hydraulisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
50	506	Betriebsstörung Schneidrad - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
57	600	Betriebsstörung / Reparatur Band & Seiltrieb												
52	601	Betriebsstörung Bandpressenstation	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
53	602	Betriebsstörung Überlagerung	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
58	603	Betriebsstörung Überlagerung	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
60	604	Betriebsstörung Dichtung Aufschneppf	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
61	605	Betriebsstörung Förderlager	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
62	606	Betriebsstörung Förderpumpe P.2.2. - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
700		Betriebsstörungen / Reparatur RT & Logistik												
84	701	Betriebsstörung Druckluftanlage - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
85	702	Betriebsstörung Druckluftanlage - elektrisch	16.817.818.905.906.907.908	0,5	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
86	703	Betriebsstörung Hebegerät - mechanisch	207.905.907.908	1	0	1	0	0	1	0	0	30	10000	
87	704	Betriebsstörung Hebegerät - elektrisch	207.905.907.908	1	0	1	0	0	1	0	0	30	10000	
88	705	Betriebsstörung Stromversorgung - mechanisch	207.905.907.908	0	0	1	1	0	0	1	0	30	10000	
89	706	Betriebsstörung Stromversorgung - elektrisch	207.905.907.908	0	0	1	1	0	0	1	0	30	10000	
800		Betriebsstörungen / Reparatur Separatanlage												
94	801	Betriebsstörung Separatanlage - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
95	802	Betriebsstörung Separatanlage - elektrisch	16.817.818.905.906.907.908	0	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
96	803	Bereinigung Separatanlage	16.817.818.905.906.907.908	0	0	0	0	0	0	0	0	720		
97	804	Betriebsstörung Bentonitmischanlage - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
98	805	Betriebsstörung Bentonitmischanlage - elektrisch	16.817.818.905.906.907.908	0	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
99	806	Betriebsstörung Speisepumpe P1.1. - mechanisch	16.817.818.905.906.907.908	0	0	1	0	1	0	1	0	30	10000	
900		Sonstiges												
112	901	Setzungen/Hebungen	12.815.815.815.816.817.818	0	0	1	0	1	0	0	0	30	10000	
113	902	Agbruch	12.815.815.815.816.817.818	0	0	1	0	1	0	0	0	30	10000	
114	903	Brand												
115	904	Brand												
116	905	Bohrung/Einweisung	907.908.909.910.911.912.913	0	0	0	0	0	0	0	0	30	10000	
117	906	Rettungsgabung	12.815.815.815.816.817.818	1	1	1	1	1	1	1	1	30	10000	

Abb. 87: Screenshot Prozessmodell - Seite Prozesse

Die obige Abbildung zeigt einen Screenshot des Prozessmodells. In dieser Tabelle auf der Seite „Prozesse“ sind alle dokumentierten Prozesse mit den dazugehörigen Daten aufgelistet. Sie dient zur Ermittlung möglicher Parallelprozesse, indem die für die Prozesse hinterlegten Kennzahlen anhand eines definierten Algorithmus abgefragt werden. In der obigen Tabelle fehlen die aktuellen Daten des Projektes. Auch sind nicht alle bekannten

Prozesse eingeblendet.⁴⁹⁰ Insgesamt wurden mehr 124 Prozesse ermittelt und angelegt. Sechs Prozesse lassen sich dem Vortrieb und sieben dem Rohreinbau zuordnen. Stillstand der DWEP wird durch 23 Systembedingte Ausfallzeiten (IWEP) und 88 Störprozesse verursacht.

Für jeden Prozess wurden die technisch möglichen Parallelprozesse identifiziert. Dies ergab, dass beispielsweise zum IWEP „Kabelverlängerung“ acht Prozesse parallel möglich sind, zum IWEP „Auffüllen Hydrauliköl“ hingegen 89 Prozesse.

Zudem wurden für jeden einzelnen Prozess die notwendigen Arbeitskräfte identifiziert. Aus vergleichbaren Projekten wurden die Prozessdauern als Durchschnittswerten ermittelt. Aufgrund der geringen Anzahl verwendbarer Daten, konnten diese nicht als aussagekräftige Werte für das Modell verwendet werden. Jedoch wurden sie als Richtwerte für die Schätzung durch die Bauleitung vor Ort genutzt. Die verwendeten Dauern sind durch den Aufbau einer Datenbasis im Zuge der Verwendung des Prozessmodells zu validieren bzw. zu aktualisieren.

Die Fälligkeiten wurden ebenfalls für jeden Prozess ermittelt. Diese ergaben sich teilweise aus technischen Gründen (z.B. Rohreinbau alle 2 Meter aufgrund der Rohrlänge) oder wurden ebenfalls durch das fachkundige Personal abgeschätzt. Wie die Dauern sind diese Werte durch den Aufbau einer Datenbasis im Zuge der Verwendung des Prozessmodells zu validieren bzw. zu aktualisieren.

⁴⁹⁰ Die Veröffentlichung dieser ist zum einen für die Forschungsarbeit nicht entscheidend, zum anderen zählen sie zum unternehmensinternen Wissen der Fa. *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG*.

Anlage 3: Maschinenauswertung / Schichtprotokoll (beispielhafter Auszug)

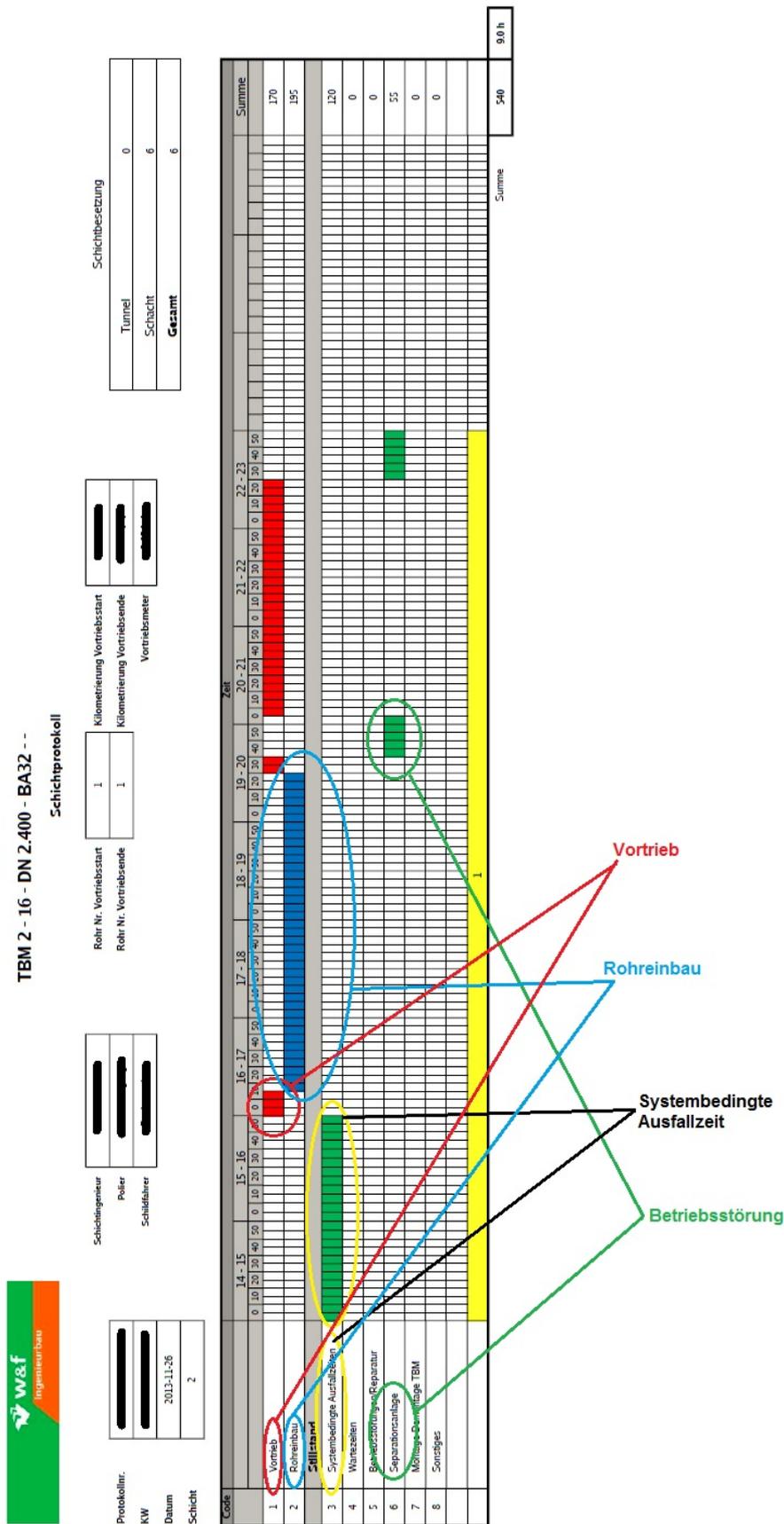


Abb. 89: Beispiel Maschinenauswertung / Schichtprotokoll

Abb. 89 zeigt ein Schichtprotokoll. Diese Schichtprotokolle wurden genutzt, um im Prozessmodell erste Kennzahlen für die Prozesse zu bilden. Zudem werden diese Art Schichtprotokolle in allen Tunnelvortriebsprojekten der Fa. *Wayss & Freytag Ingenieurbau AG* (W&F) genutzt. Um eine intuitive Anwendbarkeit des Prozessmodells im Unternehmen zu gewährleisten, wurde aus diesem Grund das Farbschema der Schichtprotokolle übernommen bzw. erweitert. Mit Rot werden Vortriebsprozesse, mit Blau Rohreinbauprozesse und mit Grün Störprozesse sowie Unterstützungsprozesse dargestellt. Damit die IWEP von den NWEF (farblich) unterschieden werden können, wurde für diese im Prozessmodell nach Absprache mit Vertretern von W&F die Farbe Gelb verwendet.

Anlage 4: Projektbericht / Vortriebsauswertung (beispielhafter Auszug)

TBM 5 - 43 - DN 1.600 -				
Projektbericht				
Projektbericht von:				
Tunnelmeter		765.0	[m]	
Station		765.0	[m]	
Gesamtmenge gebauter Rohre		196	Rohr	
Beste Tagesleistung (2014-02-13)		24.66	[m/Tag]	
Beste Wochenleistung (KW: 2014-05)		115.81	[m/Woche]	
Vortrieb		765.69	[m]	
Mittl. Vortriebsleistung / Arbeitstag (erster AT:2013-12-09)		16.29	[m/AT]	
Rohre		196	Rohr	
Mittl. Rohreinbauleistung / Arbeitstag (erster AT:2013-12-09)		4.17	[Rohre/AT]	
Arbeitstage		47	[AT]	
Vortriebsstage		46	[VT]	
Mittl. Vortriebsleistung / Vortriebsstag (erster VT:2013-12-10)		16.65	[m/VT]	
Gesamtverfügbarkeit ((Vortrieb + Rohreinbau) / Summe)		76.08	[%]	
Fertigstellungsgrad		99.35	[%]	
		Summe		Prozent
		[min]	[h]	%
100 Vortrieb		22955	382.6	51.95 %
200 Rohreinbau		10660	177.7	24.13 %
300 Systembedingte Ausfallzeiten		5550	92.5	12.56 %
400 Wartezeiten		15	0.2	0.03 %
500 Betriebsstörungen/Reparatur		3790	63.2	8.58 %
600 Separationsanlage		945	15.8	2.14 %
800 Sonstiges		270	4.5	0.61 %
Summe		44185	736.42	100.00 %
Projektbericht - Code-Liste				
Projektbericht von:				
Code	Beschreibung	[min]	[h]	%
100	Vortrieb	2295	382.6	52
100	Vortrieb	22955	382.6	100
101	Dehnerfahren im VT-Stillstand	0	0.0	0
200	Rohreinbau	1066	177.7	24
200	Rohreinbau	10660	177.7	100
300	Systembedingte Ausfallzeiten	5550	92.5	13
300	Systembedingte Ausfallzeiten	95	1.6	2
301	Verlängerung Hauptstromversorgung Rohrtunnel	680	11.3	12
302	Kontrollvermessung SLS-LT	650	10.8	12
303	Einbau Rückhängung (Rohrbremse)	35	0.6	1
304	Ausbau Rückhängung (Rohrbremse)	0	0.0	0
305	Anschweißen Vortriebsrohre Anfahrphase	0	0.0	0
306	Lösen Vortriebsrohre Anfahrphase	0	0.0	0
307	Auffüllen Hydrauliköl	10	0.2	0
308	Wartung-Abschmieren	0	0.0	0
309	Reinigung Bentonit-Misch- und Verpreßeinheit	0	0.0	0
310	Vorbereitung für Vortrieb	1755	29.2	32
311	Einbau Gleis	0	0.0	0
312	Einstieg in TBM - Bohrwerkzeuge - Inspektion – Planmäßig	0	0.0	0
313	Einstieg in TBM - Bohrwerkzeuge - Wechsel – planmäßig	0	0.0	0
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren -Bodenmaterialaustrag über Separation - vor	1120	18.7	20
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	1050	17.5	19
399	Sonstiges	155	2.6	3
400	Wartezeiten	15	0.2	0
400	Wartezeiten	0	0.0	0
401	Warten auf Vortriebsrohrlieferung / Rohr abladen	15	0.2	100
402	Warten auf Bentonitschmiersuspension	0	0.0	0
403	Warten auf Ersatzteile und Servicepersonal	0	0.0	0
404	Warten auf Bodenabfuhr	0	0.0	0
405	Ein-/Ausschleuszeiten	0	0.0	0

Abb. 90: Beispiel Projektbericht / Vortriebsauswertung

In Abb. 90 ist beispielhaft ein Projektbericht und ein Teil einer Vortriebsauswertung (unterer Teil - „Code-Liste“) dargestellt.

Im oberen Teil sind für einen bestimmten Zeitraum die Leistungsdaten wie gefahrene Tunnelmeter, Anzahl eingebauter Rohre oder die mittlere Vortriebsleistung dargestellt. Darunter zu sehen ist die Auswertung für diesen Zeitraum, aufgeteilt in Prozessarten Vortrieb, Rohreinbau, Systembedingte Ausfallszeiten, Wartezeiten, Betriebsstörungen, Separationsanlage, Montage-Demontage und Sonstiges.

Die dargestellte Auswertung ergibt für die DWEP eine Verfügbarkeit von über 75 % (Vortrieb 51,95 %, Rohreinbau 24,13 %). Für die IWEP wurden 12,56 % der Zeit und für die NWEP insgesamt 11,36 % der Zeit verwendet.

Diese Werte spiegeln ungefähr eine Auswertung von 11 vergleichbaren Rohrvortriebsprojekten wider. Die DWEP konnten bei diesen durchschnittlich in 67 % der Fälle durchgeführt werden. Die restlichen 33 % teilten sich auf geplanten (12 % IWEP) und ungeplanten Stillstand (21 % NWEP) auf. Aufgrund der geringen Anzahl an vergleichbaren Daten, können diese Werte nicht als repräsentativ gewertet werden.

Anlage 5: Stillstandauswertung (beispielhafter Auszug)

Code	Code Text	Von	Bis	Kritische Minuten	Unkritische Minuten	Gesamte Minuten
310	Vorbereitung für Vortrieb	2014-07-11 06:00	2014-07-11 13:30	450	0	450
100	Vortrieb	2014-07-11 13:30	2014-07-11 17:30	230	0	230
502	Schild Elektrik allgemein	2014-07-11 15:20	2014-07-11 15:30	10	0	10
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-11 17:30	2014-07-11 17:45	15	0	15
612	Nachbereitung/Reinigung Separation	2014-07-11 17:45	2014-07-11 18:00	15	0	15
310	Vorbereitung für Vortrieb	2014-07-12 06:00	2014-07-12 06:15	15	0	15
100	Vortrieb	2014-07-12 06:15	2014-07-12 17:05	430	0	430
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-12 07:05	2014-07-12 17:25	55	0	55
200	Rohrbau	2014-07-12 07:15	2014-07-12 14:45	120	0	120
517	Förderleitung	2014-07-12 09:45	2014-07-12 10:00	15	0	15
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	2014-07-12 13:05	2014-07-12 13:10	5	0	5
699	Sonstiges	2014-07-12 15:45	2014-07-12 16:30	45	0	45
612	Nachbereitung/Reinigung Separation	2014-07-12 17:25	2014-07-12 18:00	35	0	35
300	Systembedingte Ausfallzeiten	2014-07-14 06:00	2014-07-14 10:10	250	0	250
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	2014-07-14 10:10	2014-07-14 15:05	10	0	10
100	Vortrieb	2014-07-14 10:15	2014-07-14 17:30	265	0	265
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-14 11:20	2014-07-14 17:45	40	0	40
200	Rohrbau	2014-07-14 11:30	2014-07-14 16:40	120	0	120
526	Hydraulische Rohrbremse	2014-07-14 15:40	2014-07-14 16:20	20	0	20
612	Nachbereitung/Reinigung Separation	2014-07-14 17:45	2014-07-14 18:00	15	0	15
310	Vorbereitung für Vortrieb	2014-07-15 06:00	2014-07-15 06:15	15	0	15
100	Vortrieb	2014-07-15 06:15	2014-07-15 16:40	335	0	335
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-15 07:00	2014-07-15 16:55	45	0	45
200	Rohrbau	2014-07-15 07:10	2014-07-15 17:45	155	0	155
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	2014-07-15 08:05	2014-07-15 13:30	10	0	10
515	SLS-LT Vermessung	2014-07-15 09:00	2014-07-15 14:00	100	0	100
200	Rohrbau	2014-07-15 10:25	2014-07-15 15:10	45	0	45
612	Nachbereitung/Reinigung Separation	2014-07-15 17:45	2014-07-15 18:00	15	0	15
310	Vorbereitung für Vortrieb	2014-07-16 06:00	2014-07-16 06:15	15	0	15
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-16 06:15	2014-07-16 14:15	15	0	15
100	Vortrieb	2014-07-16 06:20	2014-07-16 15:35	335	0	335
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	2014-07-16 07:05	2014-07-16 15:10	40	0	40
200	Rohrbau	2014-07-16 07:15	2014-07-16 15:25	50	0	50
200	Rohrbau	2014-07-16 09:15	2014-07-16 14:10	120	0	120
510	Speisepumpe N°1	2014-07-16 15:35	2014-07-16 18:00	145	0	145
510	Speisepumpe N°1	2014-07-17 06:00	2014-07-17 09:20	200	0	200
499	Sonstiges	2014-07-17 09:20	2014-07-17 11:20	120	0	120
100	Vortrieb	2014-07-17 11:20	2014-07-17 16:30	215	0	215
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-17 12:35	2014-07-17 16:45	30	0	30
200	Rohrbau	2014-07-17 12:45	2014-07-17 18:00	130	0	130
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	2014-07-17 13:40	2014-07-17 13:45	5	0	5
200	Rohrbau	2014-07-17 14:35	2014-07-17 14:55	20	0	20
310	Vorbereitung für Vortrieb	2014-07-23 06:00	2014-07-23 06:15	15	0	15
600	Separationsanlage	2014-07-23 06:15	2014-07-23 06:30	15	0	15
100	Vortrieb	2014-07-23 06:30	2014-07-23 17:30	345	0	345
517	Förderleitung	2014-07-23 06:40	2014-07-23 07:00	20	0	20
314	Spül- und Förderkreislauf freifahren - Bodenmaterialausttrag über Separation - vor Rohrwechsel	2014-07-23 08:20	2014-07-23 17:45	40	0	40
200	Rohrbau	2014-07-23 08:30	2014-07-23 13:00	110	0	110
315	Spül- und Förderkreislauf - Entlüftung - nach Rohrwechsel	2014-07-23 09:35	2014-07-23 09:40	5	0	5
200	Rohrbau	2014-07-23 10:25	2014-07-23 16:50	40	0	40

Abb. 91: Beispiel Stillstandauswertung

Die obige Abbildung zeigt beispielhaft eine Stillstandauswertung. Diese wurden als Basis für die ersten Auswertungen der Prozessdauern und -häufigkeiten genutzt. In den verfügbaren Dokumenten wurde eine weitere Spalte zur Eintragung von Kommentaren und Erläuterungen genutzt. In dieser wurden insbesondere die Störungen (Sonstige) näher spezifiziert, was eine Zuordnung und Auswertung äußerst schwierig und aufwendig machte. Durch die im Prozessmodell verwendeten exakten Prozessbezeichnungen und die Möglichkeit neue Prozesse anzulegen, soll dieses Vorgehen verhindert werden und eine auswertbare Datenbasis geschaffen werden.

Anlage 6: 7-W-Methode (5W2H-Methode)

7-W-Methode (5W2H-Methode)

Eine bei Toyota angewendete Technik zur Hinterfragung des bisherigen Vorgehens stellt die 7-W-Methode dar, welche im Englischen auch als 5W2H-Methode bekannt ist. Bei dieser werden sieben Fragen (Was? Weshalb? Wo? Wann? Wer? Wie? Wie viel?) gestellt, um Informationen bzgl. des Ziels, Grundes, Ortes, Ablaufs, der Mitarbeiter, Methoden und Kosten zu erlangen. Die folgende Tabelle stellt Beispiele für Fragen nach einer bestimmten Tätigkeit dar.

Frage Deutsch	Frage Englisch	Wonach	Beispiele
Was?	What?	Ziel	Was wird getan? Ist eine andere Tätigkeit sinnvoller?
Weshalb?	Why?	Grund	Weshalb ist die Tätigkeit erforderlich? Ist sie eliminierbar?
Wo?	Where?	Ort	Wo wird die Tätigkeit ausgeführt? Ist ein anderer Ort sinnvoller?
Wann?	When?	Ablauf	Wann wird die Tätigkeit ausgeführt? Ist ein anderer Zeitpunkt sinnvoller?
Wer?	Who?	Mitarbeit	Wer führt die Tätigkeit aus? Ist ein anderer Mitarbeiter sinnvoller?
Wie?	How?	Methode	Wie wird die Tätigkeit ausgeführt? Ist das die optimale Ausführung?
Wie viel?	How much?	Kosten	Wie viel kostet die Tätigkeit? Ist eine wirtschaftlichere Variante möglich? Was kostet eine Verbesserung?

Tabelle 22: 7W-Methode ⁴⁹¹

⁴⁹¹ Vgl. Kirsch, 2008, S.195