

# Bestimmung der Investitionskosten von Verkehrswegen, Brücken und Tunneln zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung über die Gesamtnutzungsdauer unter besonderer Berücksichtigung der Objektkonzeption

Marina Hoffeller

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung einer  
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger

Prüfer\*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann
2. Prof. Dr.-Ing. Tanja Kessel
3. Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel

Die Dissertation wurde am 10.01.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 15.05.2023 angenommen.



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung der Technischen Universität München. An dieser Stelle möchte ich all jenen meinen Dank aussprechen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem akademischen Lehrer und Doktorvater Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann, der mir stets umfassende Unterstützung gewährte. Ihm danke ich für das Vertrauen, das er in mich gesetzt hat. Durch seine konstruktiven Anmerkungen und nicht zuletzt seine Diskussionsbereitschaft hat er entscheidend zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tanja Kessel danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie die anregende Diskussion zum Thema der Instandsetzung von Infrastrukturbauwerken. Des Weiteren danke ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel für seine nachhaltige Unterstützung als dritter Prüfer und seine entgegengebrachte Geduld als Lehrstuhlinhaber im Rahmen meiner parallelen Lehrtätigkeit.

Weiter geht mein Dank an Herrn Dr. Wolfgang Eber, der stets für den wissenschaftlichen Gedankenaustausch zur Verfügung stand. Sein theoretisches Fachwissen, sowie spezifisch für Berechnungen von Modellen bzw. Simulationen bereicherte eine Vielzahl von Diskussionen, die wesentlich ein wissenschaftliches Fundament für mich schafften.

Ein besonderer Dank gilt auch allen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen für die schöne gemeinsame Zeit am Lehrstuhl. Die kollegiale und angenehme Arbeitsatmosphäre sowie die große Hilfsbereitschaft untereinander werde ich stets in guter Erinnerung bewahren.

Mein persönlicher Dank gilt meinen Eltern und meiner Schwester für den bedingungslosen Rückhalt und die immerwährende Unterstützung auf meinem akademischen Weg – ohne sie wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen.



## Inhaltsübersicht

Inhaltsübersicht	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIII
Formelverzeichnis	XIV
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einführung	1
2 Forschungsgegenstand	15
3 Grundlagen und Stand der Forschung	28
4 Methodik zur Entwicklung eines Modells	94
5 Modellentwicklung zur Bestimmung der Investitionskosten über die Gesamtnutzungsdauer	133
6 Ergebnisse	202
7 Beispiel zur Anwendung des Modells	219
8 Schlussbemerkungen	255
Glossar	258
Literaturverzeichnis	264
Anhangverzeichnis	277



## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsübersicht	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XIII
Formelverzeichnis	XIV
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einführung	1
1.1 Forschungsgegenstand	3
1.2 Problemstellung	5
1.3 Forschungsmethodik und Zielsetzung	10
1.4 Aufbau der Arbeit	12
2 Forschungsgegenstand	15
2.1 Grundlagen der Infrastruktur	15
2.2 Infrastruktur als Immobilie	17
2.3 Zukünftige Investitionskosten als Bestandteil der Lebenszykluskosten von Immobilien	19
2.4 Kritische Infrastrukturen	20
2.5 Verkehrsinfrastruktur	21
2.5.1 Altersstruktur Verkehrswege	22
2.5.1.1 Straßen	22
2.5.1.2 Schienenwege	23
2.5.2 Altersstruktur Brücken	24
2.5.3 Altersstruktur Tunnel	26
3 Grundlagen und Stand der Forschung	28
3.1 Begriff der Instandhaltung	28
3.1.1 Maßnahmen der Instandhaltung	29
3.1.2 Instandhaltungsstrategien	31
3.1.3 Instandhaltungsstrategien auf Basis von Kritikalität	34
3.1.4 Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur	36
3.2 Normen und Richtlinien zur Instandhaltung der Straßenverkehrsinfrastruktur	37
3.2.1 Bauwerksprüfungen nach DIN 1076	37
3.2.2 Bewertung des Bauwerkszustandes nach RI-EBW-PRÜF	38
3.2.3 Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln	39
3.2.4 Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen	39
3.2.5 FGSV AP 9 – Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung	40
3.2.6 Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Straßenbrücken	42

## Inhaltsverzeichnis

---

3.3	Lebensdauer von Bauteilen	43
3.3.1	Abnutzungsvorrat	44
3.3.2	Technische Lebensdauer	46
3.3.2.1	Definition	46
3.3.2.2	Einflüsse auf die technische Lebensdauer	47
3.3.2.3	Verfahren zur Ermittlung von Lebensdauern zur Beschreibung der Alterung	54
3.3.2.4	PIARC - Life Cycle Aspects of electrical Road Tunnel Equipment	55
3.3.2.5	Referenzwerte für Lebensdauern aus der Literatur	56
3.3.3	Wirtschaftliche Nutzungsdauer	60
3.3.3.1	Definition	60
3.3.3.2	Einflüsse auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer	60
3.3.4	Gesamtnutzungsdauer	61
3.3.5	Abhängigkeiten von Bauteilen	62
3.3.6	Modelle zu Abnutzungswahrscheinlichkeiten	63
3.4	Kostenermittlung und Kostensicherheit	64
3.4.1	Kostenermittlung nach DIN 276	64
3.4.2	Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbaus	65
3.4.3	Verfahren zur Kostenermittlung	66
3.4.4	Kostenkennwerte	67
3.4.5	Einflussfaktoren auf Kostenkennwerte	68
3.4.5.1	Bauwerks-Merkmal-faktoren	68
3.4.5.2	Makroökonomische Einflussfaktoren	69
3.4.6	Kostenprognosemodelle zur Erhaltung von Brückenbauwerken	70
3.4.7	Verfahren und Ermittlung zur Prognose der Lebenszykluskosten	71
3.4.8	Pavement Management System - PMS	76
3.5	Zuverlässigkeitsanalyse	77
3.5.1	Datenerfassung/ Erhebungsmethoden	78
3.5.2	Grundbegriffe und Definitionen	79
3.5.3	Lebensdauer-Verteilungen	80
3.5.4	Extremwerttheorie	84
3.5.5	Methoden zum Schätzen in parametrischen Modellen	85
3.5.6	Konfidenzintervall	87
3.6	Grundlagen der Modellbildung und Simulation	88
3.6.1	Grundlagen der Simulation	88
3.6.2	Systeme	89
3.6.3	Arten von Simulationen	91
3.7	Zwischenfazit und Forschungsziel	91
4	Methodik zur Entwicklung eines Modells	94
4.1	Strukturierung von Objekten in Bauteile	96
4.2	Bildung von Instandsetzungsgruppen	98
4.3	Herleitung eines Verfahrens zur Bestimmung der technischen Lebensdauer LD unter Berücksichtigung der Strategie	99
4.3.1	Quantifizierung der technischen Lebensdauer	100
4.3.2	Datenerfassung und -auswertung	105
4.3.3	Bestimmung der Instandsetzungsreihenfolge von Bauteilen einer Instandsetzungsgruppen	111
4.4	Standardraumstrukturen für Verkehrsinfrastrukturobjekte	117



## Inhaltsverzeichnis

---

4.4.1	Bauwerkstyp	119
4.4.2	Baugruppen	119
4.4.3	Standardraumstrukturen	120
4.4.4	Bauteile und Positionen	121
4.4.5	Quantifizierung der Investitionskosten	122
4.4.5.1	Methodik der Untersuchung	125
4.4.5.1.1	Kennzahlen der deskriptiven Statistik	125
4.4.5.1.2	ABC- Analyse	128
4.4.5.2	Einflussfaktoren	128
4.4.5.3	Fazit	130
4.4.6	Skalierung der Standardräume	131
4.5	Grenzen und Annahmen innerhalb des Modells	131
5	Modellentwicklung zur Bestimmung der Investitionskosten über die Gesamtnutzungsdauer	133
5.1	Strukturierung von Objekten	133
5.1.1	Verkehrswege	133
5.1.1.1	Bauwerksstruktur	133
5.1.1.2	Instandsetzungsgruppen	135
5.1.2	Brückenbauwerke	137
5.1.2.1	Bauwerksstruktur	137
5.1.2.2	Instandsetzungsgruppen	140
5.1.3	Tunnel	143
5.1.3.1	Bauwerksstruktur	143
5.1.3.2	Instandsetzungsgruppen	147
5.2	Genese von Standardraumstrukturen	151
5.2.1	Datenbasis	152
5.2.2	Priorisierung von Leistungen	154
5.2.3	Standardraumstruktur Brücken	156
5.2.3.1	Gründung	157
5.2.3.2	Unterbau	158
5.2.3.3	Erdaushub	159
5.2.3.4	Überbau	160
5.2.3.5	Kappen	161
5.2.3.6	Ausstattung auf Kappen	163
5.2.3.7	Fahrbahnbelag	163
5.2.3.8	Entwässerung	164
5.2.3.9	Fahrbahnübergänge	165
5.2.3.10	Lager	166
5.2.3.11	Vogelschutz	166
5.2.3.12	Böschungstreppe und Pflaster	167
5.2.3.13	Gerüste	167
5.2.3.14	Abbruch/Instandsetzung	168
5.2.3.15	Objekteigenschaften	168
5.2.4	Standardraumstruktur Tunnel	170
5.2.4.1	Gründung	171
5.2.4.2	Baugrubenverbau	171
5.2.4.3	Offene Bauweise	171
5.2.4.4	Erdaushub	172
5.2.4.5	Geschlossene Bauweise	172

5.2.4.6	Abdichtung	172
5.2.4.7	Entwässerung	173
5.2.4.8	Beleuchtung	174
5.2.4.9	Belüftung	176
5.2.4.10	Verkehrstechnische Anlagen	178
5.2.4.11	Notrufeinrichtungen	179
5.2.4.12	Videoüberwachung	179
5.2.4.13	Lautsprecheranlage	180
5.2.4.14	Brandmeldeanlage	180
5.2.4.15	Löscheinrichtungen	181
5.2.4.16	Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung	181
5.2.4.17	Tunnelfunk	181
5.2.4.18	Energieversorgung	182
5.2.4.19	Steuerung	184
5.2.4.20	Verkabelung	184
5.2.4.21	Fahrbahn	185
5.2.4.22	Kappen	185
5.2.4.23	Abbruch/ Instandsetzung	185
5.2.4.24	Objekteigenschaften	185
5.2.5	Standardraumstruktur Verkehrswege	187
5.2.5.1	Straßen	187
5.2.5.1.1	Erdarbeiten	188
5.2.5.1.2	Oberbau	189
5.2.5.1.3	Ausstattung	189
5.2.5.1.4	Entwässerung	189
5.2.5.1.5	Abbruch/ Instandsetzung	190
5.2.5.2	Schienenwege	190
5.3	Standardisierung von Einflussfaktoren zur Ermittlung der Lebensdauern	191
5.3.1	Instandhaltungsniveau	191
5.3.2	Außeneinflüsse	192
5.3.3	Nutzungsintensität	196
5.3.4	Zusammenfassung	198
6	Ergebnisse	202
6.1	Objektstruktur und Instandsetzungsgruppen	202
6.2	Lebensdauer	205
6.3	Standardraumstrukturen	210
6.4	Zusammenfassung	215
7	Beispiel zur Anwendung des Modells	219
7.1	Eingabe	219
7.2	Festlegung der Standardräume	225
7.3	Zuordnung von Kostenkennwerten	226
7.4	Implementierung des Modells in eine Simulation	233
7.5	Ergebnis	236
7.5.1	Herstellungskosten nach Positionen	236
7.5.2	Herstellungskosten nach Standardräumen	242

## Inhaltsverzeichnis

---

7.5.3	Instandsetzungskosten nach Positionen	244
7.5.4	Instandsetzungskosten nach Standardräumen	245
7.6	Zusammenfassung	254
8	Schlussbemerkungen	255
8.1	Zusammenfassung	255
8.2	Ausblick und Empfehlungen für weitere Untersuchungen	256
Glossar		258
Literaturverzeichnis		264
Anhangverzeichnis		277
Anhang A – Standardräume Brücke		278
Anhang B – Standardräume Tunnel		284
Anhang C – Standardräume Straßenverkehrswege		302

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Bestimmung der zukünftigen Investitionskosten in Abhängigkeit des Zeitpunkts .....	4
Abbildung 1-2: Aufgabenbereiche der Instandhaltung der Infrastruktur .....	9
Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit .....	14
Abbildung 2-1: Netzentwicklung der Bundesautobahnen von 1950 bis 2016 in Deutschland, kumuliert .	22
Abbildung 2-2: Durchschnittsalter Gleise DB Netz AG .....	24
Abbildung 2-3: Bestandsentwicklung Brücken an Bundesfernstraßen .....	25
Abbildung 2-4: Durchschnittsalter der Brücken DB Netz AG .....	26
Abbildung 2-5: Entwicklung der Anzahl und Länge der Tunnel in Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes (Stand: 31.12.2017).....	27
Abbildung 3-1: Einflussgrößen .....	28
Abbildung 3-2: Gliederung der Instandhaltung nach DIN 31051 .....	29
Abbildung 3-3: Begriff Erhaltung nach ASB-ING .....	30
Abbildung 3-4: Regelgröße Zeit bei der vorausbestimmten Instandhaltung .....	33
Abbildung 3-5: Regelgröße Abnutzungsvorrat bei der zustandsorientierten Instandhaltung .....	33
Abbildung 3-6: Überblick über die verschiedenen Instandhaltungsarten nach DIN EN 13306.....	34
Abbildung 3-7: Zusammenhang des Kritikalitätsmaßes und der Instandhaltungsstrategien .....	35
Abbildung 3-8: Entwicklung der Investitionen von Bundesfernstraßen getrennt nach Neubau und Erhalt	36
Abbildung 3-9: Investitionen der DB Netz AG in das Bestandsnetz 2015-2020 .....	37
Abbildung 3-10: Gliederung der Zustandserfassung und –bewertung.....	41
Abbildung 3-11: Objekt O mit Bauteilen B als Untersuchungsgegenstand .....	44
Abbildung 3-12: Zeitlicher Verlauf des Abbaus des Abnutzungsvorrates .....	45
Abbildung 3-13: Gliederung der Abnutzungsursachen .....	46
Abbildung 3-14: Dehnungsrate von Asphalt in Abhängigkeit der Temperatur .....	50
Abbildung 3-15: Druckfestigkeit von Beton in Abhängigkeit der Temperatur und Zuschlagsart.....	51
Abbildung 3-16: Ableitung der Gesamtnutzungsdauer .....	62
Abbildung 3-17: Aufbau eines Bauwerk-Management-Systems.....	71
Abbildung 3-18: Verteilung des Instandsetzungsrückstaus .....	74
Abbildung 3-19: Migration des Instandsetzungsrückstaus des Netzes von Bundesautobahnen .....	75
Abbildung 3-20: Badewannenkurve .....	78
Abbildung 3-21: Übersicht von Simulation, System, Modellbildung, Auswertung.....	88
Abbildung 3-22: Systemkomponenten .....	89
Abbildung 3-23: beispielhafte Modellstruktur .....	90
Abbildung 4-1: Quellen zur Strukturierung der Objekte in Bauteile .....	97
Abbildung 4-2: Mögliche Strukturierung eines Objekts in Bauteile .....	97
Abbildung 4-3: Analyse der physischen Abhängigkeiten von angrenzenden Bauteilen .....	99
Abbildung 4-4: Vergleich eines linearen Verlaufs und einer Weibullverteilung.....	101
Abbildung 4-5: Beispielhafter Verlauf des Abnutzungsvorrates und Instandsetzungsgrenzen .....	102
Abbildung 4-6: Annahme einer Serienstruktur eines Bauteils.....	103
Abbildung 4-7: Vorgehen zur Datensammlung .....	109
Abbildung 4-8: Vorgehen zur Auswertung der Datensammlung .....	110
Abbildung 4-9: Reihenfolge von Instandsetzungszeitpunkten für $\lambda m = \max \lambda_i$ .....	113
Abbildung 4-10: Reihenfolge der Instandsetzungen für $\lambda m \lambda_i \geq b$ .....	114
Abbildung 4-11: Einflussmatrix für alle n Bauteile .....	115
Abbildung 4-12: Allgemeines Rahmenmodell für Standardraumstrukturen .....	118
Abbildung 4-13: Darstellung der verschiedenen Baugruppen.....	120
Abbildung 4-14: Datenmodell: Erfassung der vorhandenen Datensätze .....	123
Abbildung 4-15: Darstellung einer Verteilung im Boxplot.....	127
Abbildung 4-16: Erweitertes Datenbankmodell .....	130

Abbildung 5-1: Analyse der physischen Abhängigkeiten eines Straßenverkehrswegs .....	136
Abbildung 5-2: Einflussmatrix für Verkehrswege.....	137
Abbildung 5-3: Analyse der physischen Abhängigkeiten einer Brücke im Fahrbahnbereich.....	141
Abbildung 5-4: Analyse der physischen Abhängigkeiten einer Brücke im Kappenbereich.....	141
Abbildung 5-5: Analyse der physischen Abhängigkeiten einer Brücke für sonstige Bauteile .....	141
Abbildung 5-6: Einflussmatrix physische Abhängigkeiten für Brückenbauwerke.....	143
Abbildung 5-7: Analyse der physischen Abhängigkeiten im Fahrbahnbereich .....	147
Abbildung 5-8: Analyse der physischen Abhängigkeiten im Wand- und Deckenbereich .....	147
Abbildung 5-9: Einflussmatrix physische Abhängigkeiten Tunnelbauwerke .....	149
Abbildung 5-10: Einflussmatrix funktionale Abhängigkeiten Tunnel .....	150
Abbildung 5-11: Entwicklungsmethodik der Standardraumstrukturen .....	151
Abbildung 5-12: Datenbasis für die Baugruppe Baukonstruktion bei Tunnelbauwerken.....	153
Abbildung 5-13: Datenbasis für Brückenbauwerke .....	153
Abbildung 5-14: Ergebnisse der ABC-Analyse für Tunnelbauwerke – Teil 1.....	155
Abbildung 5-15: Ergebnisse der ABC-Analyse für Tunnelbauwerke - Teil 2 .....	156
Abbildung 5-16: Rahmenmodell Brücke .....	157
Abbildung 5-17: Eingabemaske Bauwerksdaten .....	157
Abbildung 5-18: Angaben Standardraum Gründung.....	158
Abbildung 5-19: Grundannahmen Standardraum Gründung .....	158
Abbildung 5-20: Eingabedaten Standardraum Unterbau .....	159
Abbildung 5-21: Eingabedaten Standardraum Überbau .....	161
Abbildung 5-22: Kappenausbildung nach RiZ- Ing Kap 1, Blatt 1 .....	162
Abbildung 5-23: Grundannahmen für den Standardraum Kappen .....	162
Abbildung 5-24: Beispielhafter Aufbau eines Brückenbelags .....	164
Abbildung 5-25: Aufbau der Standardraumstruktur bei Tunnelbauwerken .....	170
Abbildung 5-26: Eingabemaske Bauwerksdaten Tunnel .....	170
Abbildung 5-27: Grundannahmen Standardraum Flachgründung .....	171
Abbildung 5-28: Grundannahmen Standardraum Baugrubenverbau .....	171
Abbildung 5-29: Grundannahmen Standardraum offene Bauweise .....	172
Abbildung 5-30: Ausführungsbeispiel Standardraum Abdichtung Tunnel in geschlossener Bauweise...	173
Abbildung 5-31: Tunnelabschnitte eines lichttechnisch langen Tunnels und schematischer Verlauf der Leuchtdichte bei der Durchfahrt am Tag.....	175
Abbildung 5-32: Eingabemaske Standardraum Belüftung .....	178
Abbildung 5-33: Ermittlung der verkehrstechnischen Tunnelausstattung nach RABT .....	178
Abbildung 5-34: Notrufstation.....	179
Abbildung 5-35: Kombinierte Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung.....	181
Abbildung 5-36: Darstellung der Bauteile einer Tunnelfunkanlage .....	182
Abbildung 5-37: Aufbau der Standardraumstruktur für Straßen.....	187
Abbildung 5-38: Übersicht über die Deckschichtarten auf Bundesautobahnen.....	188
Abbildung 5-39: Eingabemaske Standardraum Straßenverkehrsweg .....	188
Abbildung 5-40: Aufbau der Standardraumstrukturen für Schienenwege.....	190
Abbildung 5-41: Cluster für den Einflussfaktor Wind.....	192
Abbildung 5-42: Cluster für den Einflussfaktor Feuchtigkeit .....	193
Abbildung 5-43: Schneedeckentage in Deutschland nach Bundesländern .....	194
Abbildung 5-44: Schneelastzonen nach DIN EN 1991-1-3/ NA:2019-04.....	195
Abbildung 5-45: Anzahl an Eistagen in Deutschland nach Bundesländern .....	196
Abbildung 5-46: Clustereinteilung der täglichen Verkehrsbelastung DTV .....	197
Abbildung 5-47: Clustereinteilung der täglichen Verkehrsbelastung DTV <sub>sv</sub> .....	197
Abbildung 5-48: Clusteranalyse der täglichen Verkehrsbelastung DTV nach Straßenklassen .....	197
Abbildung 5-49: Clusteranalyse der täglichen Verkehrsbelastung DTV <sub>sv</sub> nach Straßenklassen .....	198
Abbildung 5-50: Einflussfaktoren und deren Parameter .....	198

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 5-51: Einflussmatrix Brücke.....	200
Abbildung 5-52: Einflussmatrix Lebensdauer Tunnel.....	200
Abbildung 5-53: Einflussmatrix Lebensdauer Verkehrswege.....	200
Abbildung 6-1: Kriterien zur Bildung von Instandsetzungsgruppen .....	203
Abbildung 6-2: Instandsetzungsgruppen.....	204
Abbildung 6-3: Modelloperationen zur Herleitung einer Objektstruktur .....	205
Abbildung 6-4: Einflussfaktoren und dazugehörige Parameter.....	206
Abbildung 6-5:Zusammenhang zwischen der Lebensdauer und der Instandhaltungsstrategie .....	208
Abbildung 6-6: Vorgehen zur Erfassung der Austauschzeitpunkte.....	208
Abbildung 6-7: Ablauf zur Bestimmung der Abnutzungsverläufe.....	209
Abbildung 6-8: Bestimmung der Instandsetzungszeitpunkte .....	210
Abbildung 6-9: allgemeines Rahmenmodell für die Genese der Standardraumstrukturen.....	211
Abbildung 6-10: Entwickelte Standardräume Straße .....	212
Abbildung 6-11: Entwickelte Standardräume Brücke.....	212
Abbildung 6-12: Entwickelte Standardräume Tunnel .....	213
Abbildung 6-13: Ergebnis der ABC-Analyse für Tunnelbauwerke KGR 400 .....	214
Abbildung 6-14: Ablauf zur Bestimmung der Investitionskosten .....	215
Abbildung 6-15: Gesamtablauf über alle Teilbereiche Teil 1 .....	217
Abbildung 6-16: Gesamtablauf über alle Teilbereiche Teil 2 .....	218
Abbildung 7-1: Querschnitt der untersuchten Brücke .....	220
Abbildung 7-2: Ansicht der untersuchten Brücke .....	220
Abbildung 7-3: Eingabemaske des Modells .....	221
Abbildung 7-4: Eingabemaske zur Berechnung der zukünftigen Instandsetzungskosten .....	224
Abbildung 7-5: Abnutzungsverlauf des Bauteils Fahrbahnübergang mit Instandsetzungsgrenze $g_i$ .....	225
Abbildung 7-6: Ablauf zur Bestimmung der Herstellungskosten .....	226
Abbildung 7-7: Kosten für Positionen „Kappe Stahlbeton“ (links) und „Kappe Bewehrung“ (rechts).....	227
Abbildung 7-8: Kosten für Position „Abstreifung der Schutzschicht“ .....	228
Abbildung 7-9: Variationskoeffizienten der Positionen .....	229
Abbildung 7-10 Variationskoeffizienten der Positionen – Teil 1 .....	230
Abbildung 7-11: Variationskoeffizienten der Positionen – Teil 2 .....	231
Abbildung 7-12: Variationskoeffizienten der Positionen – Teil 3 .....	232
Abbildung 7-13: Variationskoeffizienten der Positionen– Teil 4 .....	233
Abbildung 7-14: Ablaufschema der Simulation .....	235
Abbildung 7-15: Grundmodell der Simulation.....	235
Abbildung 7-16: Standardraum Erdbau.....	236
Abbildung 7-17: Standardraum Gründung .....	237
Abbildung 7-18:Standardraum Unterbau.....	237
Abbildung 7-19: Standardraum Überbau.....	238
Abbildung 7-20: Standardraum Lager .....	238
Abbildung 7-21: Standardraum Kappen .....	238
Abbildung 7-22: Standardraum Fahrbahn .....	239
Abbildung 7-23: Standardraum Fahrbahnübergang.....	239
Abbildung 7-24:Standardraum Böschungstreppe .....	239
Abbildung 7-25: Standardraum Ausstattung Kappen.....	240
Abbildung 7-26: Standardraum Traggerüste .....	240
Abbildung 7-27: Standardraum Entwässerung.....	241
Abbildung 7-28: Herstellungskosten nach Standardräumen.....	242
Abbildung 7-29: Verteilung der Gesamtkosten nach Standardräumen.....	243
Abbildung 7-30: Anteil der Baugruppen an den Gesamtkosten .....	244
Abbildung 7-31: Standardraum Abbruch und Instandsetzung .....	245
Abbildung 7-32: Instandsetzungszeitpunkte – reaktive Strategie .....	246

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 7-33: Instandsetzungszeitpunkte - Mischstrategie .....	246
Abbildung 7-34: Instandsetzungszeitpunkte – aktive Strategie .....	247
Abbildung 7-35: Instandsetzungskosten kumuliert für die angenommene GND von 100 Jahren .....	247
Abbildung 7-36: Anteil der Standardräume an den Gesamtkosten für die verschiedenen Strategien für die angenommene GND von 100 Jahren .....	249
Abbildung 7-37: kumulierte Instandsetzungskosten je Jahr für die angenommene GND von 100 Jahren, reaktive Strategie .....	249
Abbildung 7-38: kumulierte Instandsetzungskosten je Jahr für die angenommene GND von 100 Jahren, Mischstrategie .....	250
Abbildung 7-39: kumulierte Instandsetzungskosten je Jahr für die angenommene GND von 100 Jahren, aktive Strategie.....	250
Abbildung 7-40: kumulierte Instandsetzungskosten gegliedert nach Standardräumen für die angenommene GND von 100 Jahren.....	251
Abbildung 7-41: Kumulierte Kostenentwicklung prozentual über verschiedene Gesamtnutzungsdauern – reaktive Strategie .....	252
Abbildung 7-42: Kumulierte Kostenentwicklung prozentual über verschiedene Gesamtnutzungsdauern – Mischstrategie .....	252
Abbildung 7-43: Kumulierte Kostenentwicklung prozentual über verschiedene Gesamtnutzungsdauern – aktive Strategie.....	253
Abbildung 8-1: Standardraum Erdbau .....	278
Abbildung 8-2: Standardraum Gründung .....	278
Abbildung 8-3: Standardraum Unterbau.....	279
Abbildung 8-4: Standardraum Überbau.....	279
Abbildung 8-5: Standardraum Lager .....	280
Abbildung 8-6: Standardraum Kappe .....	280
Abbildung 8-7: Standardraum Fahrbahnbelag .....	280
Abbildung 8-8: Fahrbahnübergang.....	281
Abbildung 8-9: Standardraum Böschungstreppe und Pflaster .....	281
Abbildung 8-10: Standardraum Ausstattung Kappen.....	281
Abbildung 8-11: Standardraum Gerüste.....	282
Abbildung 8-12: Standardraum Entwässerung.....	283
Abbildung 8-13: Standardraum Instandsetzung .....	283
Abbildung 8-14: Standardraum Gründung .....	284
Abbildung 8-15: Standardraum Baugrubenverbau.....	284
Abbildung 8-16: Standardraum geschlossene Bauweise.....	284
Abbildung 8-17: Standardraum Erdaushub .....	285
Abbildung 8-18: Standardraum offene Bauweise.....	285
Abbildung 8-19: Standardraum Beleuchtung .....	285
Abbildung 8-20: Standardraum Belüftung .....	286
Abbildung 8-21: Standardraum Verkehrsanlagen .....	287
Abbildung 8-22: Standardraum Notrufstation .....	288
Abbildung 8-23: Standardraum Videoüberwachung .....	289
Abbildung 8-24: Standardraum Lautsprecher .....	290
Abbildung 8-25: Standardraum Brandmeldeanlage .....	291
Abbildung 8-26: Standardraum Löscheinrichtungen .....	291
Abbildung 8-27: Standardraum Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung .....	292
Abbildung 8-28: Standardraum Tunnelfunk.....	293
Abbildung 8-29: Standardraum Energieversorgung Teil 1 .....	294
Abbildung 8-30: Standardraum Energieversorgung Teil 2 .....	295
Abbildung 8-31: Standardraum Steuerung Teil 1 .....	296
Abbildung 8-32: Standardraum Steuerung Teil 2.....	297

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 8-33: Standardraum Verkabelung .....	298
Abbildung 8-34: Standardraum Kabeltragsysteme .....	298
Abbildung 8-35: Standardraum Fahrbahn .....	299
Abbildung 8-36: Standardraum Kappen .....	299
Abbildung 8-37: Standardraum Entwässerung.....	300
Abbildung 8-38: Standardraum Löschwasserleitung.....	301
Abbildung 8-39: Standardraum Abdichtung .....	301
Abbildung 8-40: Standardraum Erdbau .....	302
Abbildung 8-41: Standardraum Entwässerung.....	302
Abbildung 8-42: Standardraum Ausstattung .....	303
Abbildung 8-43: Standardraum Deckschicht.....	304



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Einteilung kritischer Infrastrukturen nach BMI.....	21
Tabelle 2-2: Entwicklung Betriebslänge Strecken DB Netz AG .....	23
Tabelle 2-3: Entwicklung Gleislänge Strecken DB Netz AG .....	24
Tabelle 2-4: Entwicklung Anzahl Brücken sowie der Brückenfläche der DB Netz AG .....	26
Tabelle 2-5: Entwicklung Anzahl Tunnel sowie der Tunnellänge der DB Netz AG .....	27
Tabelle 3-1: Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686 .....	47
Tabelle 3-2: Lebensdauern Tunnelbauwerke KGR 400 aus der Literatur .....	58
Tabelle 3-3: Lebensdauern Brückenbauwerke aus der Literatur .....	59
Tabelle 3-4: Übersicht der Leistungsbereiche des STLK.....	66
Tabelle 4-1: Umwandlung der Schadensbewertung in Zustandsbereiche.....	107
Tabelle 4-2: Überblick der Formeln zur Berechnung der Austauschrate .....	115
Tabelle 4-3: Instandsetzungsgruppe mit n=3 Bauteilen .....	116
Tabelle 5-1: Funktionseinheiten einer Straße nach ZIEGEL.....	134
Tabelle 5-2: Bauteile einer Straße.....	134
Tabelle 5-3: Quellen zur Strukturierung von Schienenwegen .....	135
Tabelle 5-4: Bauteile von Schienenwegen .....	135
Tabelle 5-5: Instandsetzungsgruppen für Straßenverkehrswege .....	136
Tabelle 5-6: Funktionseinheiten nach ZIEGEL.....	138
Tabelle 5-7: Gliederung eines Brückenbauwerks in Funktionseinheiten .....	139
Tabelle 5-8: Gliederung eines Brückenbauwerks in Bauteile.....	140
Tabelle 5-9: Bildung von Instandsetzungsgruppen für Brückenbauwerke .....	141
Tabelle 5-10: Strukturierung eines Tunnels nach ZIEGEL und ASB-Ing .....	144
Tabelle 5-11: Funktionseinheiten Tunnelbauwerke .....	145
Tabelle 5-12: Überblick über die Bauteilebenen von Tunnelbauwerken.....	146
Tabelle 5-13: Überblick über die Instandsetzungsgruppen von Tunnelbauwerken .....	148
Tabelle 5-14: Datenbasis für die Baugruppe Technische Anlagen bei Tunnelbauwerken .....	152
Tabelle 5-15: Standardräume Brücken und dazugehörige Objekteigenschaften .....	169
Tabelle 5-16: Lüftungsarten im Brandfall bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit täglich stockendem Verkehr .....	176
Tabelle 5-17: Lüftungsarten im Brandfall bei Richtungsverkehr mit ausnahmsweise stockendem Verkehr .....	177
Tabelle 5-18: Standardräume Tunnel und dazugehörige Objekteigenschaften.....	186
Tabelle 5-19: Standardräume Energieversorgung und Steuerung .....	187
Tabelle 7-1: Statistische Kennwerte für Positionen „Kappe Stahlbeton“ und „Kappe Bewehrung“ .....	228
Tabelle 7-2: Statistische Kennwerte für Position „Abstreifung der Schutzschicht“ .....	228

## Formelverzeichnis

Formel 2-1 Formel zur Berechnung der Lebenszykluskosten.....	19
Formel 3-1: Ausfallwahrscheinlichkeit .....	79
Formel 3-2: Überlebenswahrscheinlichkeit .....	79
Formel 3-3: Dichtefunktion einer Verteilung .....	79
Formel 3-4: Integration der Dichtefunktion .....	79
Formel 3-5: Berechnung der Ausfallrate .....	80
Formel 3-6: Dichtefunktion .....	81
Formel 3-7: Überlebenswahrscheinlichkeit .....	81
Formel 3-8: Ausfallwahrscheinlichkeit .....	81
Formel 3-9: Ausfallrate .....	81
Formel 3-10: Erwartungswert .....	81
Formel 3-11: Varianz .....	81
Formel 3-12: Wahrscheinlichkeitsfunktion nach Weibull .....	82
Formel 3-13: untere Grenze .....	82
Formel 3-14: dreiparametrische Weibullverteilung .....	82
Formel 3-15: Maximum der Zufallsvariablen .....	84
Formel 3-16: Dichtefunktion der Maxima .....	84
Formel 3-17: Standardisierung des Maximums .....	84
Formel 3-18: Fisher-Tippett-Gnedenko Theorem .....	84
Formel 3-19: Likelihood-Funktion $L$ .....	86
Formel 3-20: Logarithmierte Likelihood-Funktion.....	86
Formel 3-21: Maximierung der Maximum Likelihood-Funktion .....	86
Formel 3-22: Maximum-Kikelihood-Funktion für zensierte Stichproblem .....	87
Formel 3-23: Standardfehlers.....	87
Formel 3-24: Berechnung des Konfidenzintervalls .....	88
Formel 4-1: Berechnung der Austauschrate .....	95
Formel 4-2: zukünftige Investitionskosten als Funktion von Konzeption, Ausstattung, Dimensionierung und Lebensdauer .....	95
Formel 4-3: Lebensdauer eines Bauteils als Funktion der Einflussfaktoren .....	95
Formel 4-4: Lebensdauer als Funktion der Instandhaltungsstrategie .....	96
Formel 4-5: zukünftige Investitionskosten als Funktion von Objekteigenschaften, Einflussfaktoren und Instandhaltungsstrategie .....	96
Formel 4-6: Lebensdauer in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie.....	101
Formel 4-7: Verteilung von $X_1, \dots, X_n$ .....	103
Formel 4-8: Grenzfunktion $Gx$ .....	104
Formel 4-9: Abhängigkeit der Weibullparameter von den Einflussfaktoren .....	104
Formel 4-10: Aufgelöste Maximum-Likelihood- Funktion zur Bestimmung von $b$ .....	104
Formel 4-11: Bestimmung des Parameters $T$ .....	104
Formel 4-12: Abhängigkeit der Lebensdauer von den Einflussfaktoren .....	105
Formel 4-13: Berechnung der Parameter der Weibullverteilung aus den Erwartungswerten der Zustandsbereiche .....	108
Formel 4-14: Berechnung des Standardfehlers für $Fj'(x)$ .....	108
Formel 4-15: Berechnung des Konfidenzintervalls für $E'jx$ .....	108
Formel 4-16: Instandsetzungsgruppe.....	111
Formel 4-17: Kosten der Instandsetzungsgruppe für $tm = minti$ .....	112
Formel 4-18: Austauschrate für alle Bauteile mit $\lambda i < \lambda m$ .....	113
Formel 4-19: Austauschrate des maßgebenden Bauteils .....	113
Formel 4-20: Austauschrate für alle Bauteile $\lambda m \lambda i \geq b$ .....	114

Formel 4-21: Austauschrate des maßgebenden Bauteils für $\lambda m = b\lambda i$ .....	114
Formel 4-22: Berechnung der zukünftigen Investitionskosten .....	116
Formel 4-23: Herstellungskosten einer Position.....	124
Formel 4-24: Herstellungskosten eines Standardraums .....	124
Formel 4-25: Herstellungskosten des Bauwerks.....	124
Formel 4-26: Berechnung von <b>IKz</b> eines Bauteils .....	124
Formel 4-27: Berechnung <b>IKz</b> eines Standardraums .....	125
Formel 4-28: Berechnung <b>IKz</b> des Objekts .....	125
Formel 4-29: Median .....	125
Formel 4-30: Arithmetisches Mittel .....	125
Formel 4-31: Varianz .....	126
Formel 4-32: Standardabweichung .....	126
Formel 4-33: Variationskoeffizient.....	126
Formel 4-34: Berechnung des p-Quantils .....	127
Formel 4-35: Berechnung des angepassten Kostenkennwerts $\pi i, j$ .....	128
Formel 6-1: Lebensdauer in Abhängigkeit der Instandsetzungsgrenze.....	207

## Abkürzungsverzeichnis

### A

a.a.O.	am angegebenen Ort
A <sub>n</sub>	Angebotssumme netto
ABBV	Ablösebeträge-Berechnungsverordnung
AG	Aktiengesellschaft
AGK	Allgemeine Geschäftskosten
AP	Arbeitspapier
ASB-Ing	Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten
Aufl.	Auflage
Ausg.	Ausgabe

### B

BAB	Bundesautobahn
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BGF	Bruttogrundfläche
BKI	Baukosteninformationszentrum
BMS	Bauwerksmanagementsystem
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BPI	Baupreisindex
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BRI	Brutto-Rauminhalt
Bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise

### C

ca.	circa
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid

### D

d.h.	das heißt
DB	Deutsche Bahn
DIN EN	Deutsches Institut für Normung – Europäische Union
DIN IEC	Deutsches Institut für Normung – Internationale Standards (Elektrik und Elektrotechnik)
DIN ISO	Deutsches Institut für Normung – International Organization for Standardization
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DTV <sub>SV</sub>	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke – Schwerverkehr

**E**

e.V.	eingetragener Verein
EIK	Erstinvestitionskosten
EP	Einheitspreis
et al.	et alia
etc.	et cetera

**F**

FE	Funktionseinheit
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

**G**

G	Gewinn
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GND	Gesamtnutzungsdauer

**H**

HK	Herstellungskosten
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
Hrsg.	Herausgeber

**I**

i.d.R.	in der Regel
IG	Instandsetzungsgruppe
IK <sub>z</sub>	zukünftige Investitionskosten
ImmoWertV	Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung von Verkehrswerten von Grundstücken

**K**

KDB	Kostendatenbank
KGR	Kostengruppe
KKW	Kostenkennwert
km	Kilometer
km/h	Kilometer/Stunde

**L**

LB	Leistungsbereich
LCC	Life Cycle Costs
LD	Lebensdauer
Lph	Leistungsphase
LV	Leistungsverzeichnis

**M**

MF	Merkmalsfaktor
MLE	Maximum Likelihood Schätzer
mm	Millimeter
Mrd.	Milliarden

**N**

Nr.	Nummer
-----	--------

**O**

OK	Oberkante
----	-----------

**P**

PCC	kunststoffmodifizierter Zementmörtel
PIARC	Association Mondiale de la Route/ World Road Association
PMS	Pavement Management System

**R**

RAA	Richtlinie für die Anlage von Autobahnen
RABT	Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RF	Regionalfaktor
RI-EBW-Prüf	Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076
RiZ-Ing	Richtzeichnungen für Ingenieurbauten
RPS	Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme
RPE-Stra-01	Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen

**S**

SIB	Straßeninformationsbank
SOC	social overhead capital
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
SR	Standardraum
SRS	Standardraumstruktur

**T**

tkm	Tonnenkilometer
-----	-----------------

**U**

u.i.v.	unabhängig, identisch verteilt
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung

**V**

v.a.	vor allem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDV	Verbund Deutscher Verkehrsunternehmen
vgl.	vergleiche
VZ	Verkehrszeichen

**W**

W	Wagnis
w/z	Wasserzementwert

**Z**

z.B.	zum Beispiel
ZEB	Zustandserfassung und Bewertung
ZTV-Ing	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten





# 1 Einführung

Deutschland verfügt als eine der führenden Industrienationen und als Europas Transitland Nummer 1 über eines der dichtesten Straßen- und Schienennetze der Welt. Der große Bestand an Verkehrsinfrastrukturanlagen stellt einen erheblichen materiellen und volkswirtschaftlichen Wert dar. Ein leistungsfähiges Verkehrssystem bildet das Fundament von Wachstum, Wohlstand und Arbeit und ist für die meisten Betriebe als Produktionsfaktor zur Leistungserbringung unumgänglich. GUTENBERG definiert sogenannte Elementarfaktoren, welche zur betrieblichen Leistungserbringung notwendig sind und zählt hierzu unter dem zweiten Elementarfaktor „Arbeits- und Betriebsmittel“ alle Einrichtungen und Anlagen, „welche die technische Voraussetzung betrieblicher Leistungserstellung [..], bilden“.<sup>1</sup> Die Bedeutung eines funktionierenden Infrastrukturnetzes zur Versorgung des Wirtschaftsraumes war auch bereits 1776 SMITH bekannt, der die Infrastruktur zu den „nachhaltigsten Verbesserungen und Fortschritten“ zählt.<sup>2</sup> Durch die steigenden Handels- und Tourismusströme werden immer höhere Anforderungen an die Verfügbarkeit der Infrastruktur gestellt.<sup>3</sup> Jährlich werden innerhalb Deutschlands ca. 3,6 Mrd. Tonnen Güter und über 68 Milliarden Personen befördert.<sup>4</sup> Vor allem die Steigerung des Straßengüterverkehrs und Schwerverkehrs hat Auswirkungen auf den Zustand der Bauwerke der Infrastruktur. Von 1980 bis 2010 hat die Beförderungsleistung von 80 auf 437,3 Mrd. tkm zugenommen. Dies entspricht gegenüber 1980 einem außergewöhnlich hohen Anstieg von 546,6 %. Bis zum Jahre 2030 soll nach der Prognose des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und digitale Infrastruktur die Beförderungsleistung auf 607,4 Mrd. tkm weiter ansteigen. Dies würde eine zusätzliche Zunahme im Vergleich zum Jahr 2010 von 38,9 % bedeuten.<sup>5</sup> Aus diesen Gründen wird die Verkehrsinfrastruktur auch zu den kritischen Infrastrukturen gezählt.<sup>6</sup> Die Sicherung einer derartigen leistungsgerechten Verkehrsinfrastruktur in der Betriebsphase erfordert die Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer zielorientierten, strukturierten und kostenmäßig optimierten Erhaltung mit dem Ziel, den substantziellen Wert und die Gebrauchstauglichkeit des Straßennetzes mit möglichst geringem Ressourceneinsatz zu erhalten.

Nach Jochimsen umfasst Infrastruktur alle wachstums-, integrations- und versorgungsnotwendigen Basisfunktionen einer Gesamtwirtschaft und kann in die drei Kategorien der materiellen, institutionellen und personellen Einrichtungen unterteilt werden.<sup>7</sup> Dabei grenzt sich die materielle Infrastruktur, zu der auch die Verkehrswege gezählt werden können, durch ihr physisches Wesen von der institutionellen und personellen Infrastruktur ab und hat somit als

---

<sup>1</sup> Vgl. Gutenberg, Erich: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion, 24., unveränderte Auflage, Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft. Berlin, Heidelberg 1971, S. 3 f.

<sup>2</sup> Vgl. Smith, Adam: Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen, 12. Auflage, München 2009, S. 128.

<sup>3</sup> Vgl. Bundeszentrale für politische Bildung: Tourismusverkehr. Internetquelle.

<sup>4</sup> Vgl. Haack, Alfred: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA): Sachstandsbericht 2015 „Instandsetzung von Straßentunneln“. Gütersloh 2015, S. III.

<sup>5</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Bundesverkehrswegeplan 2030 – Entwurf. März 2016, S.55.

<sup>6</sup> Vgl. UP KRITIS: Öffentlich- Private Partnerschaft zum Schutz kritischer Infrastrukturen. Frankfurt am Main 2004. S. 4.

<sup>7</sup> Vgl. Jochimsen, Reimut: Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung. Tübingen 1966, S. 100.

einzigste direkten Einfluss auf die Immobilienwirtschaft.<sup>8</sup> Aufgrund ihrer spezifischen Nutzung lassen sich Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur in den Immobilienbegriff einordnen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verkehrsinfrastruktur mit den Bauwerken Verkehrswege, Brücken und Tunnel betrachtet. In Kapitel 2 wird der Begriff der Infrastruktur und der ihr zugehörigen Teilbereiche genau definiert.

Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland hat insbesondere in den Jahren 1970 bis 1990 eine starke Netzerweiterung zu verzeichnen. Im Bereich der Straßen ist nach der Wiedervereinigung nur noch ein moderater Anstieg an Bundesautobahnen zu verzeichnen.<sup>9</sup> Bei Brückenbauwerken stagniert das Wachstum seit 2010. Allerdings sind auch hier 71,4 % der Brückenflächen an Bundesautobahnen und 73,7 % der Brückenfläche an Bundesfernstraßen bereits vor 1990 entstanden.<sup>10</sup> Der Tunnelbau in Deutschland hat dagegen erst in den 1990er Jahren einen deutlichen Schub erhalten. Zwischen den Jahren 2000 und 2004 wurden jährlich etwa 15 km Röhrenlänge im Zuge von Bundesfernstraßen in Betrieb genommen. Über 89 % der Straßentunnel wurden nach 1989 gebaut, was einer Länge von ca. 200 km entspricht.<sup>11</sup>

Der Bund als Eigentümer der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland ist für die Erhaltung der Funktionsfähigkeit verantwortlich und stellt die finanziellen Mittel zur Verfügung. Zur Erfüllung dieser Aufgaben wurde „Die Autobahn GmbH des Bundes“ gegründet, welche sich seit dem 01. Januar 2021 um den Bau und den Erhalt des ca. 13.000 km langen Bundesautobahnnetzes kümmert. Durch die zentrale Bündelung der Aufgaben sollen die Leistungsfähigkeit des Netzes gestärkt und die Aufgaben effizienter erfüllt werden. Diese Geschäftsprozesse erfordern insbesondere Kenntnis der gesamten Kosten über den Lebenszyklus der verschiedenen Bauwerke. Während OSTERRIED<sup>12</sup> sich in ihrer Arbeit mit der Quantifizierung der Betriebskosten der Straßeninfrastruktur beschäftigt hat, wird in dieser Arbeit der Fokus auf die Ermittlung der zukünftigen Investitionskosten gelegt.

Immobilien dienen der Befriedigung des Bedürfnisses nach Nutzung. Der wertschöpfende Akt einer Immobilie liegt in der Nutzung. Anders als etwa Büroimmobilien oder Hotels, welche betriebswirtschaftlich messbare Erträge generieren, ist die Wertschöpfung von Infrastrukturbauwerken nur indirekt betriebswirtschaftlich messbar. Diese Immobilien haben einen volkswirtschaftlichen Nutzen.<sup>13</sup> Durch ihre Nutzung verursachen sie Aufwendungen, welche durch den baulichen und betrieblichen Unterhalt entstehen. Diese Aufwendungen sind notwendig, um den funktionsfähigen Zustand der Bauwerke und somit den positiven Einfluss auf die Volkswirtschaft eines Landes zu erhalten. Diese Aufwendungen werden in Investitionskosten und

---

<sup>8</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 20.

<sup>9</sup> Vgl. Deutscher Bundestag (14. Wahlperiode): Straßenbaubericht 2000. Drucksache 14/5064. Berlin 2001, S. 103.

<sup>10</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Brückenstatistik. Bergisch Gladbach 2021. Internetquelle.

<sup>11</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten. Internetquelle.

<sup>12</sup> Vgl. Osterried, Julia: Betriebskosten der Straßenverkehrsinfrastruktur als Funktion von Objekt- und Netzeigenschaften. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.

<sup>13</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre. In: Bauingenieur, Nr. 90 (2015), S. 115.

Betriebskosten unterschieden.<sup>14</sup> Zu den Betriebskosten zählen nach OSTERRIED „sämtliche Kosten, die infolge der direkten Leistungserbringung der betrieblichen Unterhaltung von Objekten der Verkehrsinfrastruktur, d.h. Straßen als Streckenabschnitte, Brücken und Tunnel, laufend entstehen“.<sup>15</sup> Maßnahmen im Rahmen der baulichen Unterhaltung haben einen wertsteigernden Charakter und verursachen Aufwendungen in Form von Investitionen, die mit dem Ziel verbunden sind, durch die Hingabe von Geld in Zukunft höhere Geldrückflüsse zu erreichen.<sup>16</sup> Investitionen bei Immobilien der Verkehrsinfrastruktur werden mit dem Ziel getätigt, das jeweilige Objekt in einen funktionsfähigen Zustand zu versetzen, um so den volkswirtschaftlichen Nutzen zu erhalten. Diese Investitionen werden als zukünftige Investitionskosten bezeichnet. Zukünftige Investitionen zeichnen sich durch einen gleichwertigen oder technisch verbesserten Ersatz eines Bauteils gleicher Bauart aus.

## 1.1 Forschungsgegenstand

Die Globalisierung führt zu einer stetig wachsenden Vernetzung von Menschen, Unternehmen und Staaten in allen Bereichen der Gesellschaft. Produkte, Rohstoffe und Dienstleistungen werden grenzüberschreitend transportiert und der Anteil der Bevölkerung, welcher täglich zur Arbeit pendelt, nimmt kontinuierlich zu. Diese Entwicklungen verdeutlichen die zunehmende Relevanz von Mobilität und erfordern eine flächendeckend gut ausgebaute und qualitativ hochwertige Verkehrsinfrastruktur mit kurzen Verbindungen zwischen Ländern, Regionen und Städten. Dabei nimmt die Straßenverkehrsinfrastruktur einen besonderen Stellenwert ein, was die Verteilung des Investitionsvolumens für den Neu- und Ausbau der Infrastruktur belegt. Demzufolge legt der Bund in seinem Investitionsrahmenplan für den Zeitraum von 2019 bis 2023 ein Investitionsvolumen in Höhe von 13,6 Mrd. Euro für den Neu- und Ausbau des Bundesfernstraßennetzes und 9,2 Mrd. Euro für den Neu- und Ausbau des Bundesschiennetzes sowie der Bundeswasserstraßen zusammen fest.<sup>17</sup> Insbesondere Ingenieurbauwerke sind neuralgische Punkte in der Straßeninfrastruktur der Bundesrepublik Deutschland. In der Baulast des Bundes befinden sich derzeit 39.928 Brückenbauwerke (Stand 01.09.2020) und 263 Tunnelbauwerke (Stand 31.12.2015) im Bereich von Bundesfernstraßen.<sup>18</sup> Die Schieneninfrastruktur verfügt über insgesamt 25.713 Brücken sowie 745 Tunnel (Stand: 2021).<sup>19</sup>

Der Wiederbeschaffungsneuwert von Bundesfernstraßen liegt zum Preisstand von 2016 bei rund 255,38 Mrd. Euro inklusive Brücken und Tunnel. Der Instandsetzungsrückstau für Brücken und Tunnel beläuft sich auf einen Wert von ca. 14,66 Mrd. Euro, für Bundesfernstraßen beträgt er rund 11 Mrd. Euro. Die gesamte Straßenverkehrsinfrastruktur inklusive Kreis- und

---

<sup>14</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre. In: Bauingenieur, Nr. 90 (2015), S. 115.

<sup>15</sup> Vgl. Osterried, Julia: Betriebskosten der Straßenverkehrsinfrastruktur als Funktion von Objekt- und Netzeigenschaften. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 3.

<sup>16</sup> Vgl. Wöhe, Günther; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München 2016, S. 472.

<sup>17</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Investitionsrahmenplan 2019-2023 für die Verkehrsinfrastruktur des Bundes (IRP). Berlin Stand 02.03.2020, S. 12.

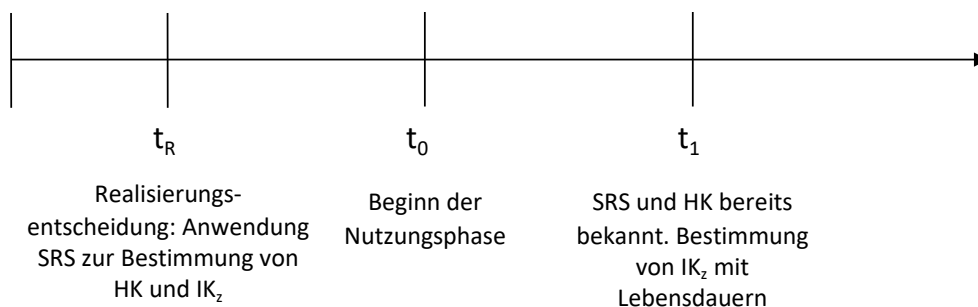
<sup>18</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Brückenstatistik. Bergisch Gladbach 2021. Internetquelle.

<sup>19</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 170-172.

Gemeindestraßen sowie Brücken und Tunnel macht damit ca. 45 % des gesamten Instandhaltungsrückstaus aus, die restlichen 55 % entfallen auf die Wasserversorgung und Abwasserentsorgung.<sup>20</sup> Weitere wissenschaftliche Untersuchungen wie der Bundesverkehrswegeplan 2030, die Kommissionsberichte zur Verkehrsinfrastrukturfinanzierung von PÄLLMANN<sup>21</sup>, DAEHRE<sup>22</sup> und BODEWIG<sup>23</sup> zeigen ebenfalls eine Unterfinanzierung sowie einen aufgebauten Instandhaltungsrückstau im Bereich der Verkehrsinfrastruktur.

Der Forschungsgegenstand besteht in der Bestimmung der Herstellungskosten sowie der zukünftigen Investitionskosten von Bauteilen sowie deren Lebensdauer von Verkehrswegen, Brücken und Tunneln über die Gesamtnutzungsdauer des Objekts.

Die Kostenberechnung kann sowohl in frühen Projektphasen (bspw. zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung) erfolgen als auch wenn das Bauwerk bereits fertiggestellt und in Betrieb ist. Werden die Kosten zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung  $t_R$  ermittelt, wird die Methodik der Standardraumstrukturen angewendet, um die Konzeption und Dimensionierung des Objekts festzulegen und so die Herstellungskosten sowie die zukünftigen Investitionskosten zu bestimmen. Erfolgt die Ermittlung der zukünftigen Investitionskosten zu einem Zeitpunkt  $t_1$  während der Nutzungsphase des Objekts, sind die einzelnen Bauteile und damit der Inhalt der Standardraumstrukturen bereits bekannt. Durch Verknüpfung der Bauteile mit Lebensdauern können auch für Bauwerke im Bestand die zukünftigen Investitionskosten bestimmt werden.



**Abbildung 1-1: Bestimmung der zukünftigen Investitionskosten in Abhängigkeit des Zeitpunkts**

Für die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten ist die Lebensdauer der einzelnen Bauteile eines Bauwerks von Bedeutung. Diese können nach Erreichen ihrer Lebensdauer ausgetauscht werden. Das Gesamtbauwerk hat somit theoretisch eine unendliche wirtschaftliche Nutzungsdauer. Diese wirtschaftliche Nutzungsdauer kennzeichnet das Ende des Lebenszyklus eines Bauwerks. Es sind nicht alle Bauteile während des Lebenszyklus auszutauschen. Für Bauteile der Baukonstruktion wie bspw. der Unterbau einer Brücke oder die Sicherung im Tunnel kann von einer unendlichen Nutzungsdauer ausgegangen werden. Eine fehlerfreie

<sup>20</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht. München 2017, S. 21.

<sup>21</sup> Vgl. Kommission Verkehrsinfrastrukturfinanzierung: Schlussbericht: Vorsitzender der Kommission: Wilhelm Pällmann. Berlin 2000.

<sup>22</sup> Vgl. Kommission Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung: Abschlussbericht: Vorsitzender der Kommission: Karl-Heinz Daehre. Berlin 2012.

<sup>23</sup> Vgl. Kommission Nachhaltige Verkehrsinfrastrukturfinanzierung: Konzeptdokument: Vorsitzender der Kommission: Bundesminister a. D. Kurt Bodewig. Berlin 2013.

Bauausführung sowie einwandfreie Materialqualität und eine Nutzung entsprechend der Planung etc. werden in diesem Fall vorausgesetzt. Diese Bauteile werden nur für die Berechnung der Herstellungskosten berücksichtigt. Diese Annahme ergibt auch Sinn, da ein Austausch dieser Bauteile nahezu unmöglich ist, „da es sich um einen kompletten Neubau handeln würde“.<sup>24</sup> Daher muss ein Objekt als Zusammensetzung von Bauteilen betrachtet und die Instandsetzungsrelevanten Bauteile mit Lebensdauern verknüpft werden.

## 1.2 Problemstellung

Aus der Altersstruktur der Bauwerke lässt sich ableiten, dass der Fokus auf die Instandhaltung immer wichtiger wird. Auch wenn Tunnelbauwerke mit einem Durchschnittsalter von 18,67 Jahren<sup>25</sup> vergleichsweise jung sind, ist hier durch die vorhandene betriebs- und sicherheitstechnische Ausstattung ebenfalls ein besonderes Augenmerk auf die Erhaltung und Erneuerung zu legen, da bereits in den ersten 15 Jahren bis zu 2/3 der gesamten technischen Anlagen erneuert werden müssen.<sup>26 27</sup>

Infrastrukturobjekte weisen hohe Kosten insbesondere für die Instandsetzung während der Betriebsphase auf. Die DIN EN 1990 gibt an, Ingenieurbauwerke für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren zu planen. Untersuchungen zeigen, dass nur etwa 20 % der Gesamtkosten einer Immobilie auf die Herstellungskosten entfallen.<sup>28</sup> KORNBLUM konnte in seiner Dissertation für den Hochbau nach 40 Jahren einen Faktor von 2,2 der Instandsetzungskosten zu den Herstellungskosten nachweisen.<sup>29</sup> LÜESSE gibt an, dass bei Brückenbauwerken jährlich in Deutschland ca. 1 % der Herstellungskosten für die Erhaltung der Bauwerke ausgegeben werden.<sup>30</sup> Bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren müssen demzufolge 50 % der Herstellungskosten in die Erhaltung investiert werden. Auch die DIN 15643-4 definiert die ökonomische Qualität „als die im Verlauf des Lebenszyklus entstandenen Kosten“<sup>31</sup>. Folglich sind für eine ökonomische Optimierung nicht nur die Erstinvestitionskosten, sondern auch die zukünftigen Investitionskosten zu betrachten. Der Fokus zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung liegt zurzeit immer noch weitestgehend auf den Herstellungskosten und nicht auf den gesamten Lebenszykluskosten, obwohl die zukünftigen Investitionskosten die Herstellungskosten weit übersteigen können und gerade in frühen Planungsphasen die

---

<sup>24</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 198.

<sup>25</sup> Eigene Berechnungen in Anlehnung an: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten. Internetquelle.

<sup>26</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht. München 2017, S. 134.

<sup>27</sup> Vgl. Welte, Urs: Knowing the useful life period of technical equipment - a prerequisite for safe tunnel operations. International Conference Tunnel Safety and Ventilation. Graz. 2004, S. 205.

<sup>28</sup> Vgl. Braun, Hans-Peter; Oesterle, Eberhard; Haller, Peter: Facility Management – Erfolg in der Immobilienwirtschaft. Berlin, Heidelberg 2004, S. 41.

<sup>29</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 232-234.

<sup>30</sup> Vgl. Lüsse, Gerd: Gezielte Bauwerkserhaltung - Erfahrungen aus der Praxis in einem Flächenland. In: Straße und Autobahn, Heft 9/98. Bonn 1998, S. 480-493.

<sup>31</sup> Deutsches Institut für Normung: DIN EN 15643-4: Nachhaltigkeit von Bauwerken- Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität. Berlin 2012, S. 18.

Beeinflussbarkeit der zukünftigen Investitionskosten am größten ist. Vor allem Brückenbauwerke als Investitionsgut des Bundes sind neuralgische Punkte in einer Verkehrsinfrastruktur. Aus diesem Grund sind Investitionen in Brücken mit großem volkswirtschaftlichem Nutzen verbunden.

Eine fundierte und genaue Kostenberechnung setzt eine vollständige Gestaltungsplanung voraus. Ein nicht vollständiger Stand der Planung kann eine Ursache für Kostensteigerungen sein.<sup>32</sup> Zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung – also dem Zeitpunkt, zu dem der Investor entscheidet, ob er das Projekt in die Realisierung umsetzt – ist der Anteil der durch Planung beschriebenen Bauteile noch relativ gering. Die vorliegende Planung lässt somit eine fundierte Kostenberechnung nicht zu. Zusätzlich zu der Berechnung der Herstellungskosten möchte der Investor auch die zukünftigen Investitionskosten bestimmen, die für Maßnahmen der Instandsetzung, die während des Objektbetriebs auftreten, aufzuwenden sind.<sup>33</sup> Für die Bestimmung der Herstellungskosten sowie der zukünftigen Investitionskosten muss das definierte Objektsoll in einer ausreichenden Detaillierungstiefe abgebildet sein, so dass alle notwendigen Bauteile bekannt sind, da die Genauigkeit der Mengenermittlung unmittelbar mit der Genauigkeit der Kostenermittlung einhergeht.<sup>34</sup> Um dieses Ziel zu erreichen, ist die Anwendung des Konzepts der Standardraumstrukturen essenziell, bei dem das Bauwerk in klar voneinander abgrenzbare Räume unterteilt wird. Durch die Standardisierung können Teile der Ausführungsplanung zur Festlegung des Bauinhalts zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung vorweggenommen werden. Sie stellt ein funktionsfähiges Instrument für eine frühzeitige und differenzierte Kostenermittlung dar.<sup>35</sup>

Die Höhe der zukünftigen Investitionskosten wird maßgeblich durch die Variablen Kostenkennwert, Austauschrate und Verzehrmenge der einzelnen Bauteile bestimmt. Kostenkennwerte beziehen sich dabei auf einzelne Positionen. Die Bildung von Kostenkennwerten, die sich in Abhängigkeit geometrischer Abmessungen auf das ganze Bauwerk beziehen, ist für eine fundierte und aussagekräftige Kostenprognose nicht zielführend. Es stehen zwar verschiedene Tabellenwerke bzw. Datenbanken für die Ermittlung von Herstellungskosten von Immobilien zur Verfügung (z.B. BKI-Tabellen, Sirados Datenbank etc.), deren Anwendung nur einen geringen Bestimmungsaufwand mit sich bringt, allerdings sind diese Daten aufgrund ihrer Normierung ungenau und berücksichtigen nicht die individuelle Objektkonzeption. Diese Daten gewährleisten dementsprechend keine vollumfängliche Kostensicherheit.

---

<sup>32</sup> Vgl. Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2013, S. 15.

<sup>33</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 5-6.

<sup>34</sup> Vgl. Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2013, S. 158.

<sup>35</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 11.

Während im Bereich der Immobilienwirtschaft für Renditeobjekte die ganzheitliche Erfassung der Kosten über den Lebenszyklus eines Bauwerks schon länger praktiziert wird, um die Wirtschaftlichkeit solcher Projekte zu prüfen, hat dieser Ansatz bei der Verkehrsinfrastruktur erst in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. In der Literatur gibt es bereits einige Ansätze zu Lebenszykluskostenmodellen im Bereich der Infrastruktur. Die „Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Straßenbrücken“<sup>36</sup> sowie die „Ablösebeträge- Berechnungsverordnung“<sup>37</sup> (ABBV) beschäftigen sich mit der Ermittlung der Erhaltungs- und Unterhaltungskosten von Infrastrukturbauwerken. Hier werden lediglich prozentuale Angaben in Bezug auf die Herstellungskosten gemacht, was für eine fundierte Kostenprognose nicht differenziert genug ist. Allein für den Nachholbedarf und den Erhalt der Verkehrsinfrastruktur entstand in den letzten Jahren ein jährlicher Bedarf von über sieben Mrd. Euro. Um die Leistungsfähigkeit der Straßenverkehrsinfrastruktur dauerhaft aufrechterhalten zu können, sollte dagegen in Straßen und Ingenieurbauwerke investiert werden.<sup>38</sup>

Für den Brückenbau haben sich bspw. WITTKÉ<sup>39</sup>, VON DRACHENFELS<sup>40</sup> sowie ROSE<sup>41</sup> mit der Entwicklung von Kostenprognosemodelle beschäftigt. Diese Prognosen basieren auf einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie und orientieren sich an dem bei den Brückenprüfungen vorgefundenen Zustand. Diese Modelle zielen auf eine kurzfristige Instandsetzungsplanung ab. Insbesondere kurzfristige Sperrungen führen zu Effizienzverlusten in einem Unternehmen. SCHULZ zeigt in einer Untersuchung, dass die Auswirkungen auf den gesamten Wirtschaftskreislauf desto höher sind, je mehr mangelhafte Brücken in einem Wirtschaftsraum vorhanden sind. Produktivitätsverluste, erhöhte Transaktionskosten oder schlechte Erreichbarkeiten aufgrund von Brückensperrungen führen mittelfristig zu Standortverlagerungen und zur Verminderung der Wettbewerbsfähigkeit.<sup>42</sup> Höhere Kosten für Unternehmen entstehen im Bereich Betriebskosten, Zeitkosten, Unfallkosten, Lärmkosten, Kosten der Schadstoffbelastung und CO<sub>2</sub>-Emissionskosten. Volkswirtschaftliche Substanzverluste ergeben sich vor allem durch erhöhte Betriebs- und Zeitkosten. Je nach Kapazitätsreserven und Art der Ausweichstrecken resultieren für die einzelnen Bereiche unterschiedlich hohe Verluste. Bei einer Bundesstraße ergeben sich aufgrund geringer Kapazitätsreserven und damit verbunden vermehrter Staubbildung größere negative volkswirtschaftliche Effekte als bei Autobahnen.<sup>43</sup> Durch die korrektive Instandhaltungsstrategie,

---

<sup>36</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). 2007.

<sup>37</sup> Vgl. Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz, ABBV, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (01. Juli 2010).

<sup>38</sup> Vgl. Straßen. NRW: Infrastruktur: „Schwarze Null“ sorgt für bröckelnde Brücken. Internetquelle.

<sup>39</sup> Vgl. Wittke, Berndt.: Darstellung eines Verfahrens zur Beschreibung und Bewertung von Schadensfällen an Bauwerken im Hinblick auf eine Risikoabschätzung, gezeigt an Spannbetonbrücken. Dissertation. Technische Universität Darmstadt. 1986.

<sup>40</sup> Vgl. von Drachenfels, (ohne Vornamen): Erfahrung mit Wartung und Unterhaltung von Brücken. Vortragsveranstaltung Instandsetzung von Brücken. Essen 1984.

<sup>41</sup> Vgl. Rose, Karl: Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken. Dissertation, Düsseldorf 1989.

<sup>42</sup> Vgl. Schulz, Wolfgang H.; Mainka, Miriam: Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Sperrung der A1-Rheinbrücke für den LKW-Verkehr. In: Wissenschaftliche Studie im Auftrag von Pro Mobilität. Köln 2013, S.32.

<sup>43</sup> Vgl. Schulz, Wolfgang H.; Mainka, Miriam: Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Sperrung der A1-Rheinbrücke für den LKW-Verkehr. In: Wissenschaftliche Studie im Auftrag von Pro Mobilität. Köln 2013, S.24-25.

welche in Deutschland häufig angewendet wird, kommt es zu plötzlich auftretenden Schäden an Verkehrsinfrastrukturprojekten. Kritische Punkte innerhalb der Verkehrsinfrastruktur müssen daher mit einer anderen Strategie instandgehalten werden, die eine höhere Verfügbarkeit gewährleistet, um den volkswirtschaftlichen Schaden im Falle eines Ausfalls so gering wie möglich zu halten. Dementsprechend sollte für wirtschaftlich bedeutendere Streckenabschnitte eine vorausbestimmte Instandhaltung nach DIN 13306 angewendet werden. Allerdings sollte dabei eine effiziente Instandhaltung nicht ausschließlich als eine Instandhaltungsstrategie für das gesamte Objekt angesehen werden, sondern vielmehr „als eine Mischung aus der jeweils effizienten Strategie“ für die jeweiligen Funktionseinheiten.<sup>44</sup>

Die Bereitstellung und Erhaltung der Infrastruktur können nach ZIEGEL<sup>45</sup> als zwei unterschiedliche Aufgabenbereiche verstanden werden. Die Instandhaltung kann als betriebswirtschaftliche sowie als volkswirtschaftliche Aufgabe verstanden werden. Bei einem volkswirtschaftlichen Ansatz, wie er bei ZIEGEL behandelt wird, tritt der Staat als Institution auf und stellt die Infrastruktur als Gut für die Wertschöpfung zur Verfügung, welche von Dritten erbracht wird.<sup>46</sup> Er kann keinen monetären Nutzen aus der Infrastruktur ziehen. Betrachtet man die Instandhaltung der Infrastruktur aus betriebswirtschaftlicher Sicht, tritt der Staat als Unternehmer auf und die Infrastruktur entspricht dem Produkt des Unternehmens.<sup>47 48</sup> Im Gegensatz zu der volkswirtschaftlichen Betrachtung, bei der der Nutzen maximiert wird, konzentriert sich der betriebswirtschaftliche Aufgabenbereich darauf, die Mittel möglichst gewinnbringend einzusetzen. Hier soll ein wirtschaftliches Optimum hinsichtlich der Kosten nach den Regeln der Betriebswirtschaftslehre erreicht werden.<sup>49</sup> In Abbildung 1-2 sind die beschriebenen Aufgabenbereiche der Instandhaltung der Infrastruktur dargestellt.

---

<sup>44</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S.258.

<sup>45</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 10.

<sup>46</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S.10.

<sup>47</sup> Vgl. Marshall, Tim; Erlhoff, Michael, Hrsg.: Design dictionary: Perspectives on design terminology, Board of International Research in Design. Basel, Boston 2008.

<sup>48</sup> Vgl. Wöhe, Gunter; Döring, Ulrich; Brosel, Gerrit: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage. München 2016, S. 280.

<sup>49</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 10.



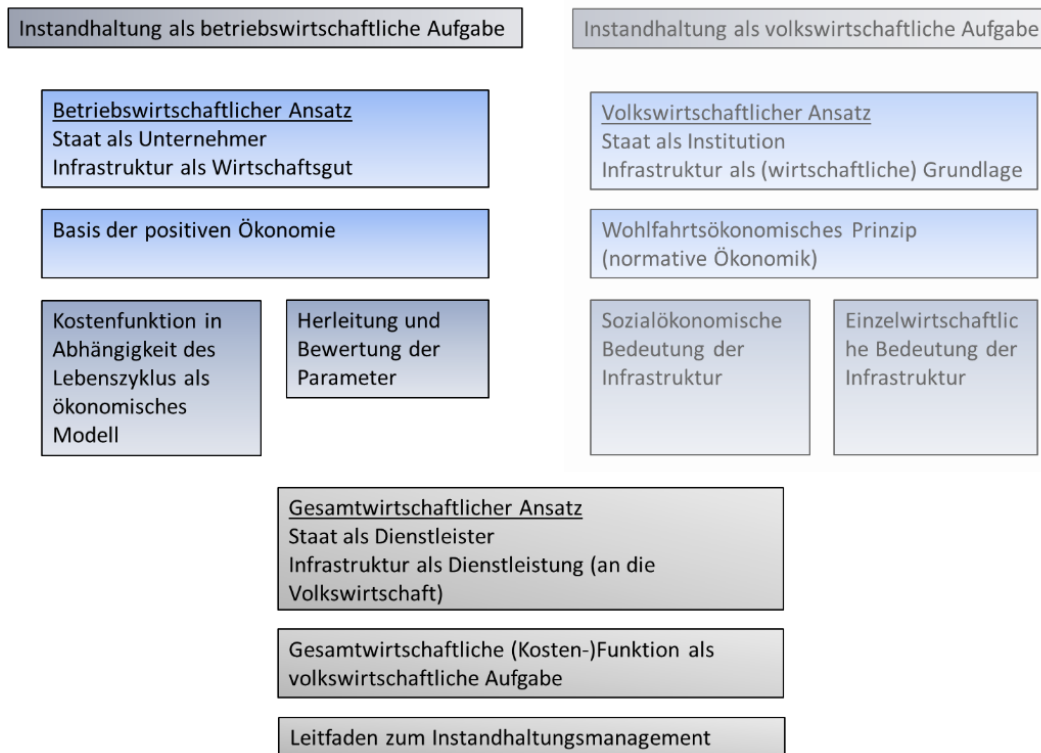


Abbildung 1-2: Aufgabenbereiche der Instandhaltung der Infrastruktur<sup>50</sup>

Die Finanzierung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland erfolgt zu ca. 2/3 aus Steuergeldern.<sup>51</sup> Daher ist eine zuverlässige Planung der Investitionen unerlässlich, um eine effektive und effiziente Verwendung der Gelder zu gewährleisten. Durch eine vollumfängliche aktive und vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie kann ein Instandhaltungsrückstau zwar vermieden werden, allerdings erfordert dies auch eine Erhöhung des finanziellen Inputs. Dadurch können eine deutlich erhöhte Funktionsfähigkeit der Infrastruktur und somit eine Maximierung des Nutzens erreicht werden. Allerdings wird bei einer derartigen Strategie Restpotential des Abnutzungsvorrates nicht ausgenutzt, welches nicht entgeltlich abgelöst werden kann. Daher wäre eine Erhöhung des finanziellen Inputs „wirtschaftswissenschaftlich nicht begründbar“.<sup>52</sup> Für eine optimale Instandhaltungsstrategie müssen sämtliche volkswirtschaftliche sowie betriebswirtschaftliche Informationen berücksichtigt und die knappen Haushaltsmittel wirtschaftlich eingesetzt werden.<sup>53</sup> Dafür sind die Einnahmen (d.h. die zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel) und Ausgaben über die Nutzungsdauer zu erfassen und zu vergleichen. Aktuell existiert keine einheitliche Erfassung für diese Informationen, welche in einem aussagekräftigen internen und externen Rechnungswegen für alle Baulastträger erfasst werden sollten. Eine

<sup>50</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 10.

<sup>51</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Finanzierung. Internetquelle.

<sup>52</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 7.

<sup>53</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 10.

Kosten- und Leistungsrechnung als Kern des Rechnungswesens kann zur Entscheidungsfindung sowie zur Kontrolle dienen. Die einzelnen Objekte und deren physischer Zustand sind pro Kostenstelle (Objekt) und Kostenträger (Baulastträger) mit einheitlich festgelegten Kostenarten abzubilden, um eine transparente Kostenherkunft sicherzustellen. Darauf aufbauend kann eine Planungsrechnung erstellt werden, die quantitative Informationen bezüglich der Produktions-, Absatz-, Investitions- und Finanzplanung liefert.<sup>54</sup>

### 1.3 Forschungsmethodik und Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung der Investitionskosten von Verkehrswegen, Brücken und Tunnel. Die Methodik kann sowohl für Neubauten in frühen Projektphasen als auch für Bestandsbauten angewendet werden. Dadurch werden die Grundlagen für den Erhalt einer funktionsfähigen Verkehrsinfrastruktur unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit geschaffen.

Um die Kosten zu ermitteln, wird die Methodik der Standardraumstrukturen nach KORNBLUM<sup>55</sup> angewendet und für die Bauwerke Verkehrswege, Brücken und Tunnel weiterentwickelt. Die einzelnen Immobilienkomponenten werden innerhalb der Standardräume zu einer Gruppe zusammengefasst und als Ganzes behandelt. Das Bauwerk wird in funktional abgegrenzte, standardisierte Elemente unterteilt, welche in der Summe das gesamte Bauwerk abbilden. Teile der Ausführungsplanung, die erst später erfolgt und die Geometrie und räumliche Lage von Bauteilen exakt bestimmt, können vorweggenommen werden, so dass eine Kostenermittlung bereits zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung möglich ist.

Die Basis für die Entwicklung der Standardräume mit den einzelnen Bauteilen bildet eine Literaturrecherche sowie eine Sichtung sämtlicher Regelwerke und Normen. Hieraus werden die einzelnen Komponenten der Bauwerke sowie deren physische und funktionale Abhängigkeiten für eine differenzierte Kostenplanung auch im Hinblick auf Vergabe und Bauausführung hergeleitet und ein Bauteilkatalog erstellt. Auf oberster Ebene wird ein Bauwerk in die Baugruppen Baukonstruktion, Ausstattung und technische Anlagen unterteilt werden. Innerhalb dieser Baugruppen werden Funktionseinheiten gebildet. Funktionseinheiten sind ihrer Funktion nach eindeutig abgegrenzt und bestehen aus einer endlichen Menge an Bauteilen, enthalten aber immer mindestens ein Bauteil.<sup>56</sup> Die Funktionseinheiten enthalten sämtliche Bauteile, welche im Rahmen einer langfristigen Instandsetzungsplanung zu berücksichtigen sind.

Ein Standardraum umfasst alle zur Erfüllung seiner Funktion notwendigen Bauteile. Das Bauteil wird durch ausführungsorientierte Positionen beschrieben, welchen normierte Kostenkennwerte und Lebensdauern zugeordnet werden. Abhängig von den Abmessungen und der Konzeption

---

<sup>54</sup> Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage. München 2016, S.632 f.

<sup>55</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 232-234.

<sup>56</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 271.

eines Objektes werden die Bauteile innerhalb eines Standardelementes skaliert und die Gesamtkosten berechnet. Hierfür werden planerische Festsetzungen wie bspw. beim Tunnel die Länge, der Querschnitt und die voraussichtliche Verkehrsbelastung benötigt. Zur Bestimmung der zukünftigen Investitionskosten eines Objektes sind die entsprechenden Objekteigenschaften zu berücksichtigen.

Bei dem vorliegenden Modell der Standardraumstrukturen handelt es sich um eine quantitative Erfassung möglicher Funktionseinheiten, welche mit verschiedenen Parametern verknüpft werden. Diese Verknüpfungen ermöglichen es, alle Verkehrsinfrastrukturbauwerke unabhängig von ihren besonderen Eigenschaften abzubilden. In der vorliegenden Arbeit wird diese Methodik konkret auf die Bauwerke Straßen, Brücken und Tunnel angewendet. Eine Überführung dieser Methodik auf andere Bereiche der technischen Infrastruktur ist bei Vorliegen der notwendigen Informationen möglich. Das Verfahren ist auch für Bauwerke der sozialen Infrastruktur anwendbar. Diese Sparten werden im Gegensatz zur technischen Infrastruktur nicht als Netz- sondern als Punktinfrastrukturen ausgebildet.

Die Ermittlung der Kosten erfolgt auf Positionsebene. Die Gesamtkosten einer Position ergeben sich als Produkt aus Kostenkennwert und Verzehrmenge. Die Herleitung der Kostenkennwerte erfolgt durch eine empirische Untersuchung. Als Datengrundlage standen beauftragte Leistungsverzeichnisse sowie Angebots-LVs mit Preisspiegeln zur Verfügung, die im Zeitraum von 2016-2019 erhoben wurden. Diese bilden die Grundlage für die Genese von Kostenkennwerten. Die Summe der Kosten über alle Standardräume stellt die Gesamtkosten des Objekts dar. Das Modell wird für die Kostengruppen 300 und 400 nach DIN 276 entwickelt. Zur Normierung der Zahlungen werden diese mit Hilfe der Kapitalwertmethode auf einen festgelegten Betrachtungszeitpunkt auf- bzw. abgezinst.

Zur Ermittlung der Lebensdauern der einzelnen Bauteile wird ein Vorgehen zur Datengewinnung- und Auswertung auf Basis von statistischen Methoden aus der Zuverlässigkeitsanalyse aufgezeigt. Die Schaffung einer einheitlichen Struktur für die Dokumentation und Gliederung der Nutzungsdauern bzw. Austauschzeitpunkte ermöglicht es, die Lebensdauern nach einer immer gleichen Systematik zu erfassen. Durch die Auswertungen von Datensammlungen wird das Ausfallverhalten als Ergebnis eines stochastischen Prozesses mathematisch beschrieben. Der noch vorhandene Abnutzungsvorrat kann so in Abhängigkeit von der Zeit abgeschätzt werden. Da der Abnutzungsvorrat eng mit dem Nutzen und der Häufigkeit der Maßnahmen verknüpft ist, lässt sich auch das Nutzenpotential einer Funktionseinheit abschätzen. Bei einer aufgeschobenen Instandhaltung sind die Ausnutzung des Abnutzungsvorrates sowie der Nutzenverlust am größten, wohingegen genau das Gegenteil für eine vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie gilt.<sup>57</sup> Durch Wahl der Instandhaltungsstrategie wird somit vorgegeben, wie groß der Nutzenverlust einer Betrachtungseinheit ist. Mit Hilfe der Modelle können die Instandsetzungszeitpunkte für die jeweilige Strategie nach ZIEGEL<sup>58</sup> abgeschätzt werden. So kann

---

<sup>57</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.

<sup>58</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 260.

unter Berücksichtigung einer Verringerung des Nutzenverlustes die Erhöhung der Kosten berechnet werden. Das Ergebnis ist dann ein Verfahren zur Ermittlung der Lebensdauern auf Bauteilebene. Für die Darstellung der entwickelten Methodik werden für das Beispiel aus der Literatur abgeleitete Werte verwendet.

Auf Basis von identifizierten funktionalen und physischen Abhängigkeiten werden Instandsetzungsgruppen definiert, welche aus einer endlichen Anzahl an  $n$  Bauteilen bestehen. Eines dieser Bauteile wird als maßgebendes Bauteil bezeichnet. Die Instandsetzung dieses Bauteils hat die Instandsetzung aller weiteren Bauteile der Instandsetzungsgruppe zu Folge. Die Bauteile, welche eine Instandsetzungsgruppe bilden, sind immer gleich. Innerhalb der einzelnen Instandsetzungsgruppen wird eine Rangfolge der Bauteile entsprechend ihren Lebensdauern erzeugt. Da die Lebensdauer jedes einzelnen Bauteils durch verschiedene Faktoren beeinflusst wird, ist diese Rangfolge für jedes Bauwerk unterschiedlich und wird individuell bestimmt. Die Lebensdauer eines Bauteils ergibt sich als Funktion von Instandhaltungsstrategie, Umgebungsbedingungen und Nutzungsintensität. Um die aus wirtschaftlicher Sicht optimale Reihenfolge von Instandsetzungen innerhalb einer Gruppe zu bestimmen, wird eine Methodik hergeleitet, die auf sämtliche Instandsetzungsgruppen angewendet werden kann.

Im Hinblick auf die vielfältigen Wechselwirkungen und Abhängigkeiten von Bauteilen und deren Verknüpfungen wird die Simulation, um in der Anwendung des Modells die Lebensdauern und deren Abhängigkeiten abzubilden. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse können Eingangsparameter verändert werden, um Optimierungsmöglichkeiten zu generieren.

## **1.4 Aufbau der Arbeit**

Der Aufbau der Arbeit ist in Abbildung 1-3 dargestellt.

Kapitel 1 gibt eine allgemeine Einführung in die Thematik der Arbeit. Es findet eine erste allgemeine Abgrenzung des Forschungsgegenstandes sowie eine Beschreibung der Themenrelevanz statt. Darüber hinaus erfolgt eine Erläuterung der Methodik der Untersuchung

Eine genaue Definition des Forschungsgegenstandes erfolgt in Kapitel 2. Dabei wird insbesondere der Begriff der Infrastruktur erläutert und für die Verwendung innerhalb dieser Arbeit definiert, um eine Verbesserung des allgemeinen Verständnisses zu schaffen. Als weiterer Schwerpunkt im zweiten Kapitel werden die Lebenszykluskosten von Immobilien betrachtet. Die zukünftigen Investitionskosten als Teil der Lebenszykluskosten werden erläutert und für diese Arbeit abgegrenzt.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Status Quo zum Forschungsgegenstand beschrieben. Es erfolgt ein Überblick über Veröffentlichungen zu Kostenprognosemodellen im Bereich der Infrastruktur. Darüber hinaus wird auf aktuell gültige Richtlinien und Normen Bezug genommen, welche die Grundlagen der Modellentwicklung darstellen. Der Begriff Lebensdauer wird definiert und verschiedene Quellen aufgezeigt, welche sich mit diesem Thema befassen. Es erfolgen eine Einführung in die Zuverlässigkeitsanalyse und Definitionen der wichtigsten Begrifflichkeiten in diesem Zusammenhang. Weiterhin wird das Konzept der Standardraumstrukturen nach

KORNBLUM<sup>59</sup> zur Kostenermittlung vorgestellt, welches die Grundlage für das Kostenmodell dieser Arbeit darstellt.

In Kapitel 4 wird die Methodik der Untersuchung beschrieben. Es erfolgt die Herleitung einer allgemeinen Systematik zur Bestimmung der zukünftigen Investitionskosten. Ein Objekt wird als Zusammensetzung mehrerer Bauteile definiert, welche die kostenverursachenden Elemente darstellen. Daher wird eine Methodik entwickelt, die das Objekt in einzelne Elemente zerlegt. Diese Elemente werden im Hinblick auf die Instandsetzung auf ihre physischen und funktionalen Abhängigkeiten untersucht. Die Kostenermittlung erfolgt mit der Methodik der Standardraumstrukturen. In diesem Kapitel soll diese Methodik weiterentwickelt werden, da sie nicht ohne weiteres auf Infrastrukturbauwerke übertragen werden kann. Die einzelnen Bauteile innerhalb der Standardräume werden durch Positionen zur Herstellung des neuen Bauteils und Demontage des defekten Bauteils beschrieben, denen Lebensdauern und Kostenkennwerte zugeordnet werden. Die zukünftigen Investitionskosten des Bauteils ergeben sich als Produkt aus der Verzehrmenge und dem Kostenkennwert multipliziert mit der Austauschrate. Zur Quantifizierung der Kostenkennwerte ist eine Datenbasis erforderlich. Die Auswertung dieser Datenbasis und die eigentliche Genese der Kostenkennwerte wird erläutert. Auf Basis der Grundlagen der Zuverlässigkeitsanalyse aus Kapitel 3 wird ein Vorgehen zur Lebensdauerermittlung entwickelt, mit dem es möglich ist, den Verlauf des Abnutzungsvorrates abzuschätzen.

In Kapitel 5 erfolgt die Anwendung der in Kapitel 4 erläuterten Methodik. Diese wird im Rahmen eines Simulationsmodells getrennt für Verkehrswege, Brücken und Tunnel umgesetzt, welches die zukünftigen Investitionskosten berechnet.

In Kapitel 6 erfolgt die Darstellung der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Kapiteln 4 und 5. Die einzelnen Teilmodelle sowie das Gesamtmodell werden anhand eines Leitfadens vorgestellt, durch den sich die Investitionskosten berechnen lassen.

In Kapitel 7 wird das entwickelte Modell anhand eines exemplarischen Untersuchungsobjekts angewendet. Es werden verschiedene Instandhaltungsstrategien exemplarisch für dieses Objekt verglichen. Anschließend erfolgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse.

Das achte Kapitel enthält ein abschließendes Resümee sowie eine kritische Würdigung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse. Den Abschluss der Arbeit bildet ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

---

<sup>59</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018.

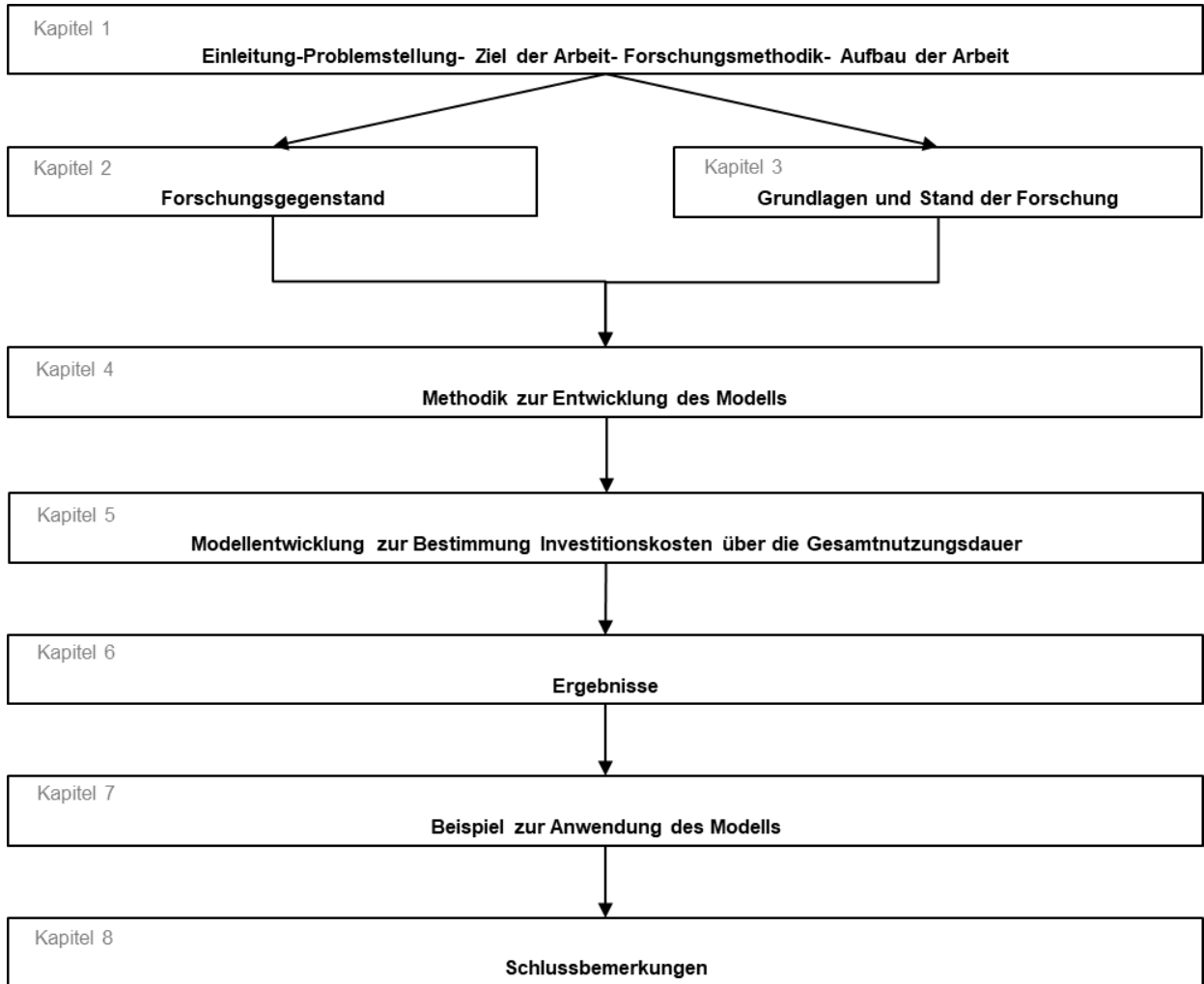


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit

## 2 Forschungsgegenstand

### 2.1 Grundlagen der Infrastruktur

Der Begriff Infrastruktur stammt ursprünglich aus dem Bereich der französischen Eisenbahnen, mit dem die erdgebundenen Einrichtungen mit langer Lebensdauer (Bahnkörper, Tunnel, Brücken etc.) bezeichnet wurden. Der Begriff setzt sich zusammen aus den lateinischen Wörtern „infra“ (unten/ unterhalb) und structura, was mit dem Begriff Unterbau definiert werden kann.<sup>60 61</sup> Die Grundlage des aktuellen Infrastrukturbegriffs bildet die Definition nach JOCHIMSEN:

*„Die Infrastruktur wird als Summe der **materiellen, institutionellen und personalen Einrichtungen** und Gegebenheiten definiert, die den Wirtschaftseinheiten zur Verfügung stehen und mit beitragen, den Ausgleich der Entgelte für gleiche Faktorbeiträge bei zweckmäßiger Allokation der Ressourcen, d.h. vollständige Integration und höchstmögliches Niveau der Wirtschaftstätigkeit, zu ermöglichen“.*<sup>62</sup>

Dabei bezeichnet die **materielle Infrastruktur** die Gesamtheit aller Anlagen, Ausrüstungen und Betriebsmittel einer Volkswirtschaft, die zur Energieversorgung, Verkehrsbedienung und Telekommunikation dienen. Hierunter fallen auch die Bauten zur Konservierung der natürlichen Ressourcen und Verkehrswege sowie Gebäude und Einrichtungen der staatlichen Verwaltung, des Erziehungs-, Forschungs-, Gesundheits- und Fürsorgewesens.<sup>63</sup>

Unter der **institutionellen Infrastruktur** werden die gewachsenen und gesetzten Normen, Einrichtungen und Verfahrensweisen in ihrer Verfassungswirklichkeit verstanden. Durch die institutionelle Infrastruktur wird der Rahmen bestimmt, „innerhalb dessen die Wirtschaftseinheiten eigene Wirtschaftspläne formulieren und in Zusammenarbeit mit anderen durchführen“. Zur institutionellen Infrastruktur gehören bspw. die Vertrags-, Eigentums- und Erbbordnung, Berufsordnung und die Koalitionsfreiheit.<sup>64</sup>

Die **personale Infrastruktur** umfasst „die Zahl und die Eigenschaften der Menschen, der arbeitsteiligen Marktwirtschaft im Hinblick auf ihre Fähigkeit, zur Erhöhung von Niveau und Integrationsgrad der Wirtschaftstätigkeit beizutragen“<sup>65</sup>. Hierzu zählen z.B. Allgemeinbildung, Spezialisierung und Qualifizierung. Die personale Infrastruktur wird auch als „Human Capital“ bezeichnet.<sup>66</sup>

---

<sup>60</sup> Vgl. Stowasser, Josef: Der kleiner Stowasser lateinisch- deutsches Schulwörterbuch. München 1968. Stichwörter: infra, structura

<sup>61</sup> Vgl. Schwind, Martin: Allgemeine Staatengeographie, Berlin 1972, S.303.

<sup>62</sup> Jochimsen, Reimut: Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung, Tübingen 1966, S. 100.

<sup>63</sup> Vgl. Jochimsen, Reimut: Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung, Tübingen 1966. S.103.

<sup>64</sup> Vgl. Jochimsen, Reimut: Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung, Tübingen 1966. S. 117.

<sup>65</sup> Jochimsen, Reimut: Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung, Tübingen: 1966. S. 133.

<sup>66</sup> Vgl. Jochimsen, Reimut: Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung, Tübingen: 1966. S. 133.

Nach JOCHIMSEN vereint der Begriff Infrastruktur demnach alle wachstums-, integrations- und versorgungsnotwendigen Basisfunktionen einer Gesamtwirtschaft.<sup>67</sup> Die materielle Infrastruktur dient dabei als (wirtschaftliche) Grundlage für die Produktion von Gütern und Diensten (Funktion der materiellen Infrastruktur), deren Kern das Verkehrswesen sowie die Energieversorgung ist. Für die materielle Infrastruktur beschreibt er folgende Voraussetzungen, die in der Regel alle gleichzeitig erfüllt sind:

- Vorleistungen, die universell verwendet werden und überall für Produktion und Konsum notwendig sind
- Standortgebundene Nutzungen
- Erstellung von hohen Kapitalkoeffizienten und niedriger Umschlagsfähigkeit des Kapitals
- Einrichtungen, die sich im Eigentum der öffentlichen Hand oder in der direkten oder indirekten Kontrolle der öffentlichen Hand befinden<sup>68</sup>

In der Wirtschaftswissenschaft wird die materielle Infrastruktur auch als „Sozialkapital“ bezeichnet. HIRSCHMAN unterscheidet zwischen „directly productive activities“ und „social overhead capital (SOC)“<sup>69</sup> Er bezeichnet mit SOC alle Grundleistungen, die für die Produktion in sämtlichen Wirtschaftsbereichen erforderlich sind. Zum Kern des social overhead capital gehören nach HIRSCHMAN das Verkehrswesen und die Energieversorgung. Das „social overhead capital“ kann also im engeren Sinne mit dem Begriff der materiellen Infrastruktur nach Jochimsen gleichgesetzt werden. Im weitesten Sinne gehören zum SOC weiterhin „alle öffentlichen Dienstleistungen von der Rechtsprechung und Aufrechterhaltung der öffentlichen Ordnung über Erziehung und öffentliches Gesundheitswesen bis hin zum Transport- und Nachrichtenwesen (...)“.<sup>70</sup> Oxford definiert das social overhead capital als „capital goods of types which are available to anybody (hence social) and are not tightly linked to any particular part of production (hence overhead). Because of their broad availability they often have to be provided by the government. Examples of social overhead capital include roads, school, hospitals, and public parks“<sup>71</sup>. Der Ausdruck SOC wird im Englischen häufig als Synonym für Infrastruktur verwendet.<sup>72</sup>

Die materielle Infrastruktur ist in ihrem Grundwesen linienförmig und weist in der Regel einen Netzcharakter auf. Innerhalb dieser Netze existieren aber auch Punktobjekte wie bspw. Bahnhöfe. Sie können auch als technische Infrastruktur bezeichnet werden, wohingegen Gemeinbedarfseinrichtungen, welche punktueller Natur sind, als soziale Infrastruktur bezeichnet werden. Hierunter fallen bspw. kulturellen Einrichtungen, Gesundheitseinrichtungen sowie Bildungseinrichtungen.<sup>73</sup>

---

<sup>67</sup> Vgl. Schwind, Martin: Allgemeine Staatsgeographie, Berlin 1972, S.303.

<sup>68</sup> Vgl. Jochimsen, Reimut, Theorie der Infrastruktur: Grundlagen der marktwirtschaftlichen Entwicklung. Tübingen: 1966. S. 105.

<sup>69</sup> Vgl. Hirschman, Albert O.: Die Strategie der wirtschaftlichen Entwicklung, Band 13, S.78.

<sup>70</sup> Vgl. Hirschman, Albert O.: Die Strategie der wirtschaftlichen Entwicklung, Band 13. S.78.

<sup>71</sup> Oxford Reference: Stichwort: social overhead capital. Internetquelle.

<sup>72</sup> Vgl. Frey, Rene L.: Infrastruktur. In: Handwörterbuch der Raumordnung. Hrsg. Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 4.Aufl. Hannover 2005, S. 469.

<sup>73</sup> Vgl. Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J.: Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung. Berlin: 2010. S. 49.



Zusammenfassend kann Infrastruktur als Grundlage für sämtliche produktive Tätigkeiten angesehen werden, welche vom Staat zur Verfügung zu stellen sind. Sie umfasst sowohl technische und soziale Infrastrukturen wie die Verkehrsinfrastruktur, Energieversorgung sowie Bildungseinrichtungen und kulturelle Einrichtungen als auch institutionelle Infrastrukturen, wie Normen und Gesetze, und personelle Infrastrukturen.

Eine Abgrenzung der materiellen Infrastruktur von der sozialen sowie personellen lässt sich durch ihr physisches Wesen vornehmen. Sie ist materiell erfassbar und hat somit als einzige direkten Einfluss auf die Immobilienwirtschaft.<sup>74</sup>

## 2.2 Infrastruktur als Immobilie

Immobilien können als „mit dem Grundstück fest verbundene Bestandteile definiert werden, wobei ein Grundstück einen begrenzten, durch Vermessung gebildeten Teil der Erdoberfläche darstellt“<sup>75</sup>. Diese Definition deckt sich auch mit § 94 BGB nach dem zu den Bestandteilen eines Grundstücks auch die sich auf dem jeweiligen Grundstück befindlichen Bauwerke (Immobilien) gehören.

Immobilien unterscheiden sich von anderen Wirtschafts- und Anlagegütern auf Grund ihrer sehr spezifischen Eigenschaften. Immobilien werden immer für eine bestimmte vorgesehene Nutzung an einem bestimmten Ort gebaut und grenzen sich durch ihre Abmessungen und Beschaffenheit von anderen Immobilien ab.<sup>76</sup> Diese Definitionen können auch auf Einrichtungen der materiellen Infrastruktur übertragen werden, welche daher ebenfalls als Immobilie verstanden werden können.

Grundsätzlich investiert ein Investor nur dann in eine Immobilie, wenn eine Nachfrage nach einer bestimmten Nutzung besteht. Die Einzahlungen resultieren dann aus den jeweiligen immobilienpezifischen Leistungen, wie z.B. bei Büro- oder Wohnimmobilien sowie Hotels und Shoppingcentern. Die Einnahmen, welche dem Investor bei derartigen Immobilien entstehen, sind betriebswirtschaftlich messbar und damit direkt über die Einnahmen wie Miete oder Pacht quantifizierbar. Immobilien können aber auch Erträge generieren, welche nicht direkt betriebswirtschaftlich quantifizierbar sind.<sup>77</sup> Diese Immobilien, zu denen u.a. neben Bauwerken der öffentlichen Verwaltung auch Infrastrukturbauwerke wie Brücken, Verkehrswege oder Tunnel gehören, erzeugen einen volkswirtschaftlichen Nutzen. Die Rendite bei diesen Immobilien ergibt

---

<sup>74</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S.20.

<sup>75</sup> Zimmermann, Josef: Immobilienprojektentwicklung. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung. Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2019, S. 1-1.

<sup>76</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Immobilienprojektentwicklung. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung. Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2019, S. 1-13, 1-14.

<sup>77</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaft in Praxis, Forschung und Lehre. In: Bauingenieur, Band 90. Ausgabe 03/2015. S. 1.

sich aus dem Nutzen im Rahmen von gesamtwirtschaftlichen Betrachtungen. Sie stellen somit die Grundlage für alle wirtschaftlichen Tätigkeiten einer Volkswirtschaft dar.<sup>78</sup>

Infrastrukturbauwerke müssen ebenso wie Immobilien anderer Nutzungsarten (z.B. Büroimmobilien, Hotelimmobilien) einen optimalen Ablauf hinsichtlich ihrer spezifischen Nutzung gewährleisten. Diese Betriebstätigkeiten, die zu der Kernaufgabe der Immobilie gehören, werden als „Funktionsbetrieb“ bezeichnet.

Definition Funktionsbetrieb:

*„Der Funktionsbetrieb umfasst die eigentlichen Geschäftsprozesse der Objektnutzung“.*<sup>79</sup>

Der Funktionsbetrieb sorgt über die Nutzungsdauer der Immobilie für direkte Einzahlungen in Form von Miete und Pacht oder für indirekte Einzahlungen in Form von volkswirtschaftlichem Nutzen. Diese Einnahmen sind somit nicht direkt quantifizierbar. Unter die Kategorie des „nicht direkt quantifizierbaren Funktionsbetriebs“ fallen Infrastrukturimmobilien. Sie generieren keine Einnahmen, haben aber einen volkswirtschaftlichen Nutzen.<sup>80</sup>

Die Lebenszykluserträge, die sich aus dem Funktionsbetrieb ergeben, sind in der Regel materiell, können aber auch wie bereits erläutert z.B. bei Infrastrukturbauwerken immateriellen Charakter haben.

Die Einnahmen setzen sich aus ordentlichen Erträgen und aus neutralen Erträgen zusammen. Nach WÖHE sind ordentliche Erträge solche Erträge, die nachhaltig erzielbar sind und sich aus dem Kerngeschäft der Immobilie ergeben, wie z.B. Mieteinnahmen. Unter die neutralen Erträge fallen alle Erfolgskomponenten, welche betriebsfremd und zufallsbedingt sind (z.B. Spekulationsgewinne, Schuldenerlass etc.).<sup>81</sup>

Über die zur Kernaufgabe einer Immobilie gehörenden Betriebstätigkeiten hinaus, gibt es noch weitere Tätigkeiten, die nicht die eigentliche Funktion darstellen, sondern den Funktionsbetrieb erst ermöglichen. Diese Tätigkeiten zielen auf den physischen sowie finanziellen Betrieb der Immobilie ab. Diese Tätigkeiten, zu denen auch die Instandhaltung des Objekts zählt, werden als Objektbetrieb bezeichnet.

Definition Objektbetrieb:

*„Der Objektbetrieb umfasst die Bewirtschaftung und die Finanzierung des eigentlichen Objekts.“*<sup>82</sup>

---

<sup>78</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaft in Praxis, Forschung und Lehre. In: Bauingenieur, Band 90. Ausgabe 03/2015. S. 1.

<sup>79</sup> Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre in: Bauingenieur 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

<sup>80</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre in: Bauingenieur 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

<sup>81</sup> Vgl. Wöhe, Günther; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München 2016, S. 637.

<sup>82</sup> Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre in: Bauingenieur 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

Im Gegensatz zum Funktionsbetrieb, der die Einzahlungen einer Immobilie generiert, erzeugen der Objektbetrieb sowie die Erstellung des Objekts selbst die Kosten des Objekts. Die gesamten Kosten einer Immobilie, die von der Planung über die Erstellung bis hin zu Verwertung des Objekts entstehen, können als Lebenszykluskosten bezeichnet werden.<sup>83</sup>

## 2.3 Zukünftige Investitionskosten als Bestandteil der Lebenszykluskosten von Immobilien

Unter dem Begriff Lebenszykluskosten wird die Gesamtheit aller Kosten verstanden, die ab dem Zeitpunkt der Idee bis zum Abschluss des Gebäudeabrisses entstehen. Nach HERZOG sind externe Kosten wie bspw. Umweltbelastungskosten und volkswirtschaftliche Kosten auch Bestandteil der Lebenszykluskosten.<sup>84</sup> Sie werden auch als „Life Cycle Costs“ (LCC) bezeichnet. Mit Hilfe der Lebenszykluskosten können der zu erwartende Verbrauch und somit die anfallenden Kosten abgeschätzt werden. Daher bildet die Ermittlung der Lebenszykluskosten die Grundlage für Immobilieninvestitionen und dient als Instrument zur Bewertung von Gebäuden. Formel 2-1 zeigt die Formel zur Berechnung der Lebenszykluskosten:

$$LCC = EIK + IK_z + BK_o + BK_z$$

**Formel 2-1 Formel zur Berechnung der Lebenszykluskosten<sup>85</sup>**

- EIK*: Erstinvestitionskosten  
*IK<sub>z</sub>*: zukünftige Investitionskosten  
*BK<sub>o</sub>*: Betriebskosten aus Objektbetrieb  
*BK<sub>z</sub>*: Betriebskosten aus Funktionsbetrieb

Die Lebenszykluskosten können in drei Kostenbereiche eingeteilt werden. Der erste und der zweite Kostenbereich umfassen die Kosten für die Projektentwicklung und die Projektrealisierung, welche auch zu den Erstinvestitionskosten zusammengefasst werden können. Diese Kosten fallen von der Realisierung bis zur Inbetriebnahme der Immobilie an. Die zukünftigen Investitionskosten werden als Investitionen von Ersatzinstandsetzung, Verbesserung, Modernisierung und Revitalisierung verstanden. Ersatzinstandsetzungs- sowie Verbesserungsmaßnahmen werden aufgrund des Erreichens der Lebensdauer eines Bauteils durchgeführt, während Revitalisierungsmaßnahmen aufgrund des Erreichens der wirtschaftlichen Lebensdauer durchgeführt werden. Modernisierungsmaßnahmen dagegen werden unabhängig vom Erreichen der Lebensdauer durchgeführt. Diese Kosten gehen im Idealfall mit einer Wertsteigerung der Immobilie einher.<sup>86</sup>

<sup>83</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre in: Bauingenieur 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

<sup>84</sup> Vgl. Herzog, Kati: Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Darmstadt 2005, S.39.

<sup>85</sup> Altmann, Isabella Christine: Einfluss von Veralterungsprozessen auf den Wert von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2017, S. 109.

<sup>86</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Immobilienentwicklung in: Bautabellen für Architekten: Mit Entwurfshinweisen und Beispielen. Hrsg.: Klaus-Jürgen Schneider et al. 21. Auflage. Köln 2014, S.8.2 - 8.30, S. 8.8–8.9.

Kosten für Revitalisierungsmaßnahmen sind in ihren Zeitpunkten nicht eindeutig vorherzusagen, da sie in Abhängigkeit zur wirtschaftlichen Lebensdauer anfallen. Diese wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst (vgl. Kapitel 3.3.3) und kann daher nicht eindeutig bestimmt werden. Investitionen für Ersatzinstandsetzungs- und Verbesserungsmaßnahmen sind dagegen abhängig von der technischen Lebensdauer.<sup>87</sup> Diese kann mit Hilfe verschiedener Modelle abgeschätzt werden (vgl. Kapitel 3.3.2), um den Zeitpunkt des Anfalls der Kosten zu bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Kosten der Ersatzinstandsetzungen untersucht. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden unter den zukünftigen Investitionskosten, diejenigen Kosten verstanden, die aufgrund von Maßnahmen der Ersatzinstandsetzung anfallen.

## 2.4 Kritische Infrastrukturen

Aufgrund der Bedeutung einer verfügbaren und funktionierenden Infrastruktur vereinbarte der Europäische Rat 2008 die Richtlinie 2008/114/EG für den Schutz kritischer Infrastrukturen. Diese Richtlinie konzentriert sich auf die Sektoren Energie und Verkehr. Die Richtlinie definiert kritische Infrastrukturen als „die in einem Mitgliedstaat gelegene Anlage, ein System oder ein Teil davon, die von wesentlicher Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen, der Gesundheit, der Sicherheit und des wirtschaftlichen oder sozialen Wohlergehens der Bevölkerung sind und deren Störung oder Zerstörung erhebliche Auswirkungen auf einen Mitgliedstaat hätte, da diese Funktionen nicht aufrechterhalten werden könnten“<sup>88</sup>. Des Weiteren werden mit „europäischer kritischer Infrastruktur (EKI)“ kritische Infrastrukturen eines Mitgliedsstaats bezeichnet, „deren Störung oder Zerstörung erhebliche Auswirkungen in mindestens zwei Mitgliedstaaten hätte“<sup>89</sup>.

Auf Basis dieser Richtlinie hat das Bundesministerium des Innern eine nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen veröffentlicht. Hier wird zwischen technischen Basisinfrastrukturen und sozioökonomischen Dienstleistungsinfrastrukturen unterschieden, welche sich entsprechend Tabelle 2-1 auf weiteren Ebenen in verschiedene Sektoren und Branchen gliedern lassen.

---

<sup>87</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Immobilienprojektentwicklung. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung. Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2019, S. 1- 23.

<sup>88</sup> Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2008/114/EG des Rates vom 8. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern. Brüssel 2008, S. 43.

<sup>89</sup> Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2008/114/EG des Rates vom 8. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern. Brüssel 2008, S. 43.

Sektoren	Branchen
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrizität</li> <li>• Gas</li> <li>• Mineralöl</li> </ul>
Informationstechnik & Telekommunikation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Telekommunikation</li> <li>• Informationstechnik</li> </ul>
Transport & Verkehr	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Luftfahrt</li> <li>• Seeschifffahrt</li> <li>• Binnenschifffahrt</li> <li>• Schienenverkehr</li> <li>• Straßenverkehr</li> <li>• Logistik</li> </ul>
Gesundheit	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medizinische Versorgung</li> <li>• Arzneimittel &amp; Impfstoffe</li> <li>• Labore</li> </ul>
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Öffentliche Wasserversorgung</li> <li>• Öffentliche Abwasserversorgung</li> </ul>
Ernährung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ernährungswirtschaft</li> <li>• Lebensmittelhandel</li> </ul>
Finanz- & Versicherungswesen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Banken</li> <li>• Börsen</li> <li>• Versicherungen</li> <li>• Finanzdienstleister</li> </ul>
Staat & Verwaltung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regierung &amp; Verwaltung</li> <li>• Parlament</li> <li>• Justizeinrichtungen</li> <li>• Notfall-/Rettungswesen einschl.</li> <li>• Katastrophenschutz</li> </ul>
Medien & Kultur	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rundfunk, gedruckte &amp; elektronische</li> <li>• Presse</li> <li>• Kulturgut</li> <li>• Symbolträchtige Bauwerke</li> </ul>

Tabelle 2-1: Einteilung kritischer Infrastrukturen nach BMI<sup>90</sup>

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Verkehrsinfrastruktur wird zu den technischen Basisinfrastrukturen gezählt. Basisinfrastrukturen sind für die Gesellschaft von wesentlicher Bedeutung, da sie auf deren uneingeschränkte Verfügbarkeit eine Volkswirtschaft angewiesen ist.<sup>91</sup> Sie besitzen eine hohe systemische Kritikalität. ZIEGEL führt an, dass eine „Ordnung hinsichtlich des Kritikalitätsaspektes“ nicht möglich sei, da die gesamte Infrastruktur vom BMI als „kritisch“ angesehen wird.<sup>92</sup>

## 2.5 Verkehrsinfrastruktur

Der Begriff der Verkehrsinfrastruktur wird im Sinne dieser Arbeit auf der Grundlage von Jochimsen definiert. Er lässt sich nach einer Vielzahl von Kriterien gliedern, wie etwa dem zu befördernden Gegenstand (z.B. Personen oder Güter) oder nach dem Verkehrsweg (z.B. Straße, Schiene oder Wasserweg). Die Einteilung nach dem Verkehrsweg ist im Rahmen dieser Arbeit

<sup>90</sup> Vgl. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Kritische Infrastrukturen – Sektoren- und Brancheneinteilung. 2021. Internetquelle.

<sup>91</sup> Vgl. Lauwe, Peter; Riegel, Christoph: Schutz kritischer Infrastrukturen. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bonn 2008, S. 113-114.

<sup>92</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S.22.

weitaus zweckmäßiger, da der Schwerpunkt dieser Arbeit auf der Verkehrsinfrastruktur liegt und diese einen Netzcharakter aufweist.

Nach OSTERRIED besteht das Gesamtnetz der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland aus mehreren Netzen  $N$ . Ein Netz  $N$  setzt sich aus einem spezifischen Anlagenbestand  $AB_N$  zusammen, welcher verschiedene räumlich abgrenzbare Objekte  $O_{N,m}$  von Straßen als Streckenabschnitten, Brücken und Tunneln umfasst. Diese Objekte besitzen entsprechende Objekteigenschaften.<sup>93</sup>

## 2.5.1 Altersstruktur Verkehrswege

### 2.5.1.1 Straßen

Abbildung 2-1 zeigt die Entwicklung des Netzes der Bundesautobahnen in Deutschland bis 2016. Bis 1990 ist die Netzentwicklung ausschließlich für die alten Bundesländer dargestellt. Ab 1991 ist die Länge der Autobahnen in den neuen Bundesländern miteinberechnet. Insbesondere zwischen den Jahren 1960 und 1990 ist eine starke Netzerweiterung der Bundesautobahnen zu verzeichnen. Nach der Wiedervereinigung 1991 ist ein moderater Anstieg des Netzes zu erkennen.

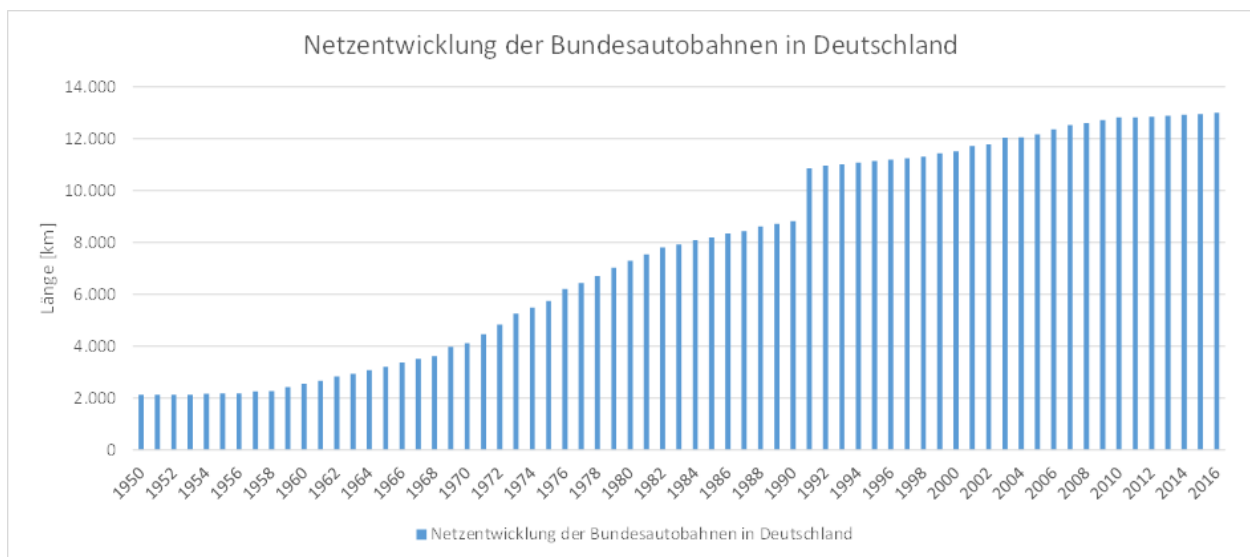


Abbildung 2-1: Netzentwicklung der Bundesautobahnen von 1950 bis 2016 in Deutschland, kumuliert<sup>94 95</sup>

Die letzte genaue Bestandserfassung der Gemeindestraßen durch das BMVI wurde im Jahr 1992 vorgenommen. Der vom BMVI herausgegeben Bericht „Verkehr in Zahlen 2016/2017“ gibt die Länge der Gemeindestraßen für das Jahr 1990 mit 327.000 km an. Dabei entfallen 199.400 km

<sup>93</sup> Vgl. Osterried, Julia: Betriebskosten der Straßenverkehrsinfrastruktur als Funktion von Objekt- und Netzeigenschaften. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 73.

<sup>94</sup> Vgl. Deutscher Bundestag (14. Wahlperiode): Straßenbaubericht 2000. Drucksache 14/5064. Berlin 2001, S. 103.

<sup>95</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2016/2017. 45. Jahrgang. Hamburg 2016, S. 101.

auf Straßen innerorts (61 %) und 127.600 km auf Straßen außerorts (39 %). Für das Jahr 1992 wird die Gesamtlänge ohne Unterteilung in innerorts und außerorts mit 413.000 km angegeben.<sup>96</sup>

Die Altersverteilung der Bauwerke in Deutschland zeigt, dass die Hauptaufgabe in Zukunft auf dem Erhalt des Netzes liegt. Der Aspekt, dass die zukünftigen Investitionskosten die Herstellungskosten über den Lebenszyklus eines Bauwerkes übersteigen können, verdeutlicht die Wichtigkeit einer zuverlässigen Prognose der Instandsetzungskosten.

### 2.5.1.2 Schienenwege

Die Informationsgrundlage zum Bestand des deutschen Schienennetzes kann als sehr gut bezeichnet werden. Die folgenden Informationen konnten der Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung LuFV (Stand: 2021) entnommen werden.

Die Betriebslänge der Strecken der DB Netz AG beträgt insgesamt 33.288 km (Stand: 2021). Im Vergleich zum Jahr 2020 hat die Betriebslänge um ca. 2 km zugenommen. Tabelle 2-2 zeigt einen Überblick über die Betriebslängen der DB Netz AG ab 2016.

Jahr	Betriebslänge DB Netz AG in km
2021	33.288
2020	33.286
2019	33.291
2018	33.298
2017	33.230
2016	33.247

**Tabelle 2-2: Entwicklung Betriebslänge Strecken DB Netz AG<sup>97</sup>**

Die Bestandsveränderung von ca. 2 km setzt sich zusammen aus einem Abgang von 8,5 km und einem Zugang von 10,7 km. Der größte Zugang mit 4,4 km resultiert aus baulichen Veränderungen bestehender Strecken. Der Abgang von 8,5 km ist zum größten Teil auf den Teilverkauf der Strecke 6822 Böhlen-Espenhain an die Eisenbahn-Bau- und Betriebsgesellschaft Pressnitzalbahn GmbH zurückzuführen.<sup>98</sup>

Die Gesamtlänge der Gleise im Jahr 2021 betrug 60.727 km und reduzierte sich damit um 41 km im Vergleich zum Vorjahr. Die Zugänge betreffen im hauptsächlichen neu gebaute, reaktivierte oder übernommene Gleise sowie Aktivierungen nach vollständigen Gleiserneuerungen. Die Abgänge sind auf 54 km Gleise zurückzuführen, welche stillgelegt, rückgebaut, verkauft oder verpachtet wurden. In Tabelle 2-3 ist die Entwicklung der Gleislängen der DB Netz AG dargestellt.<sup>99</sup>

<sup>96</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Verkehr in Zahlen 2016/2017. 45. Jahrgang. Hamburg 2016, S. 101.

<sup>97</sup> Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022. S. 165.

<sup>98</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022. S. 165-166.

<sup>99</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022. S. 168-169.

Jahr	Gleislänge DB Netz AG in km
2021	60.727
2020	60.768
2019	60.804
2018	60.803
2017	60.524
2016	60.512

Tabelle 2-3: Entwicklung Gleislänge Strecken DB Netz AG<sup>100</sup>

Im Jahr 2021 betrug das Durchschnittsalter der Gleise der DB Netz AG 20,7 Jahre. Auskunft darüber, in welchem Jahr wie viel Kilometer Gleise gebaut wurden, gibt die Deutsche Bahn nicht. Abbildung 2-2 zeigt die Entwicklung des Durchschnittsalters der Gleise der DB Netz AG.

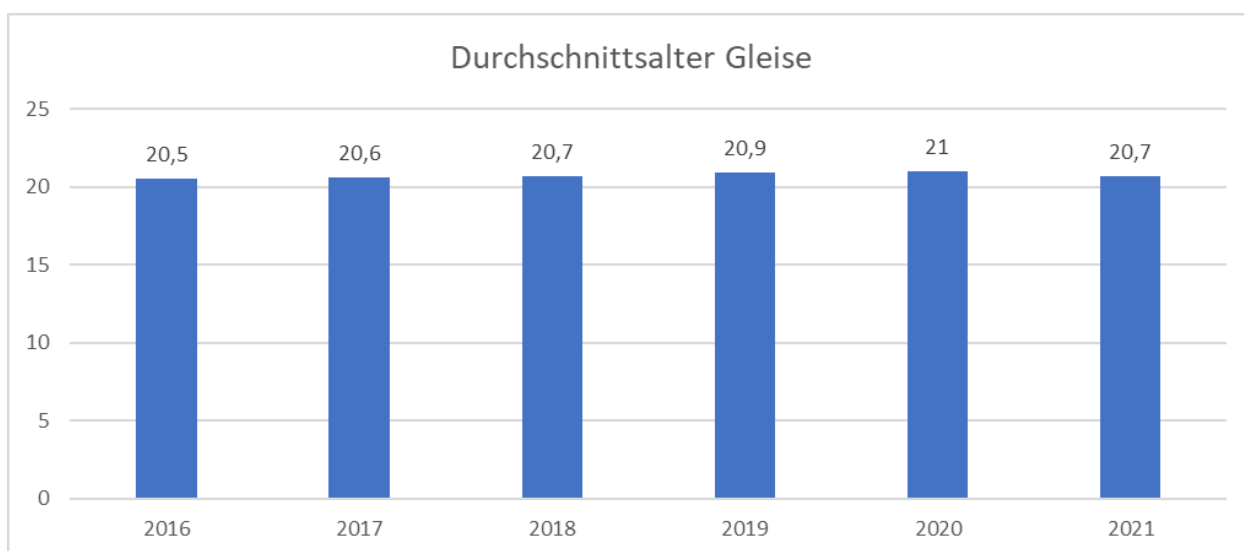


Abbildung 2-2: Durchschnittsalter Gleise DB Netz AG<sup>101</sup>

## 2.5.2 Altersstruktur Brücken

Das Netz der Bundesfernstraßen in Deutschland umfasst derzeit 39.443 Brückenbauwerke. Die Anzahl aller Teilbauwerke beträgt 51.359. Daraus ergibt sich eine Gesamtbrückenfläche von 30,57 Millionen Quadratmeter. Das Anlagevermögen beträgt über 60 Mrd. Euro. Diese Anzahl an Ingenieurbauwerken in der Straßenbaulast des Bundes verteilt sich auf 12.993 km Autobahnen und insgesamt 38.303 km Bundesstraßen. In Abbildung 2-3 ist eine Statistik dargestellt, welche die Bestandsentwicklung von Brücken an Bundesfernstraßen von 1970 bis 2020 veranschaulicht.

<sup>100</sup> Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 168.

<sup>101</sup> Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 145.



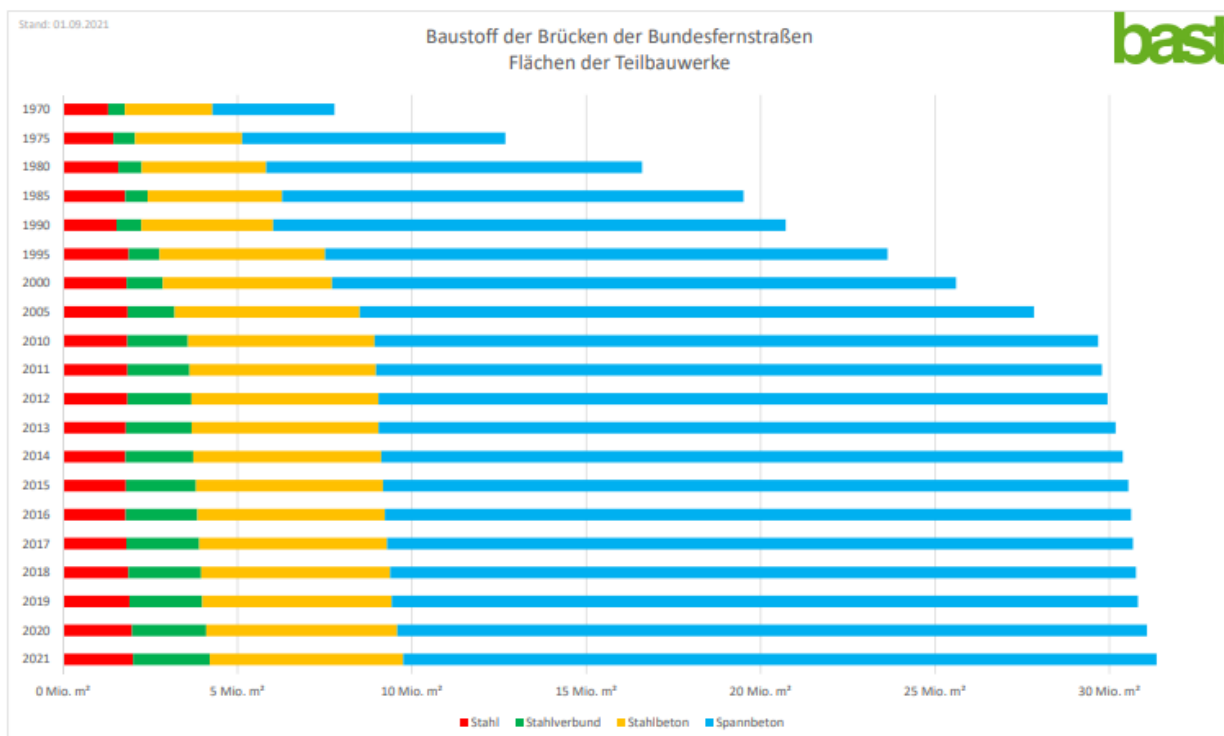


Abbildung 2-3: Bestandentwicklung Brücken an Bundesfernstraßen<sup>102</sup>

Insbesondere von 1970 bis 1985 wurden sehr viele Neubauten realisiert. Die stärkste Zunahme ist Anfang der 70er Jahre festzumachen. Mit der Eingliederung der neuen Bundesländer in die Bundesrepublik Deutschland nach der Wiedervereinigung sind in etwa zwei Mio. m<sup>2</sup> Brückenfläche hinzugekommen. Im Verhältnis zum damaligen Bestand der Bundesrepublik Deutschland stellte dies gerade mal ein Zehntel der Fläche dar. Durch diesen Aufholbedarf in Ostdeutschland erklärt sich der Anstieg an Brückenflächen in den 90er Jahren. In den letzten Jahren hat sich das Neubauvolumen dagegen reduziert. Dies liegt zum einem darin begründet, dass das Verkehrsnetz der Bundesfernstraßen in Deutschland schon sehr gut ausgebaut ist. Zum anderem müssen immer mehr der verfügbaren Haushaltsmittel für Erhaltungsmaßnahmen bzw. Ersatzneubauten aufgewendet werden.

Im Bereich der Schieneninfrastruktur existierten 2021 – wie auch bereits 2020 - insgesamt 25.713 Brücken. Das ist eine Zunahme um sechs Bauwerke im Vergleich zu 2019. Trotz der gleichbleibenden Anzahl an Brückenbauwerken wurden einige Brücken stillgelegt, zurückgebaut oder verkauft. Im Gegensatz dazu wurden insgesamt 23 Bauwerke neu gebaut. Tabelle 2-4 zeigt einen Überblick über die Entwicklung des Brückenbestandes der DB Netz AG, einmal nach Anzahl der Brücken sowie einmal nach Brückenfläche.<sup>103</sup>

<sup>102</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Brückenstatistik. Bergisch Gladbach 2021. Internetquelle, S. 2.

<sup>103</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 170-171.

Jahr	Anzahl Brücken DB Netz AG	Brückenfläche in m <sup>2</sup> DB Netz AG
2021	25.713	9.321.462
2020	25.713	9.316.981
2019	25.707	9.320.420
2018	25.710	9.331.068
2017	25.672	9.155.412
2016	25.718	9.314.713

Tabelle 2-4: Entwicklung Anzahl Brücken sowie der Brückenfläche der DB Netz AG<sup>104</sup>

Das Durchschnittsalter der Brücken der DB Netz AG berechnet sich aus der Differenz des Berichtsjahres und dem jeweiligen Aktivierungsjahr der Brücke, gewichtet mit der jeweiligen Brückenfläche des Bauwerkes. Die Anlagenzugänge- und Abgänge haben ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Altersstruktur. Im Jahr 2021 betrug das durchschnittliche Alter der Brückenbauwerke der DB Netz AG 74,4 Jahre. Abbildung 2-4 zeigt das Durchschnittsalter der Brücken.

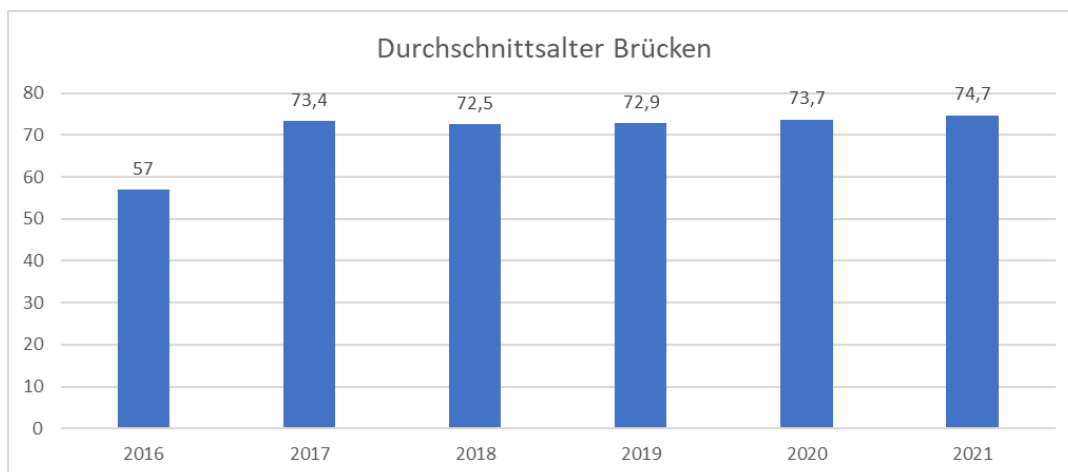


Abbildung 2-4: Durchschnittsalter der Brücken DB Netz AG<sup>105</sup>

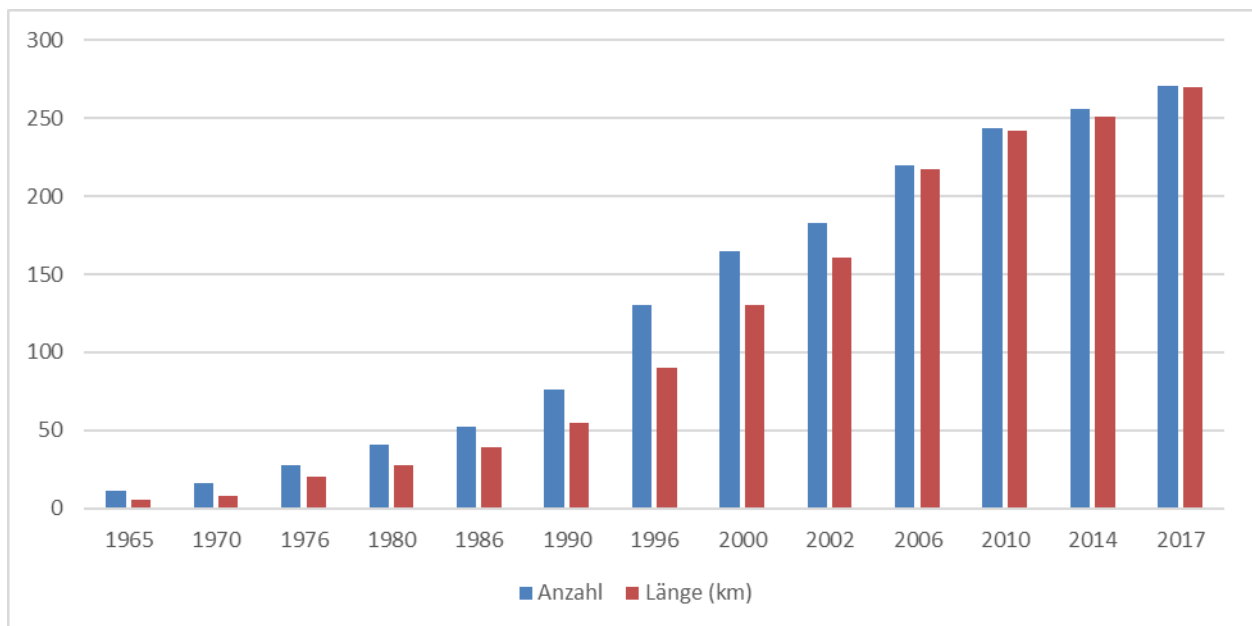
### 2.5.3 Altersstruktur Tunnel

Zum Stand 31.12.2017 befinden sich 271 Tunnel mit einer Röhrenlänge von ca. 270 km in der Baulast des Bundes. Einschließlich der Tunnel, welche sich in der Baulast der Länder oder Kommunen im Zuge von Land-, Kreis- und Stadtstraßen befinden, beträgt der Bestand an Straßentunneln in Deutschland ca. 420 Stück mit einer Gesamtröhrenlänge von über 350 km.<sup>106</sup> Abbildung 2-5 zeigt die Entwicklung des Tunnelbestands der Bundesfernstraßen in Deutschland seit 1970.

<sup>104</sup> Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 170.

<sup>105</sup> Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 145.

<sup>106</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten. Internetquelle.



**Abbildung 2-5: Entwicklung der Anzahl und Länge der Tunnel in Bundesfernstraßen in Baulast des Bundes (Stand: 31.12.2017)<sup>107</sup>**

Im Bestand der DB Netz AG befanden sich 2021 insgesamt 745 Tunnel und damit mehr als doppelt so viele wie sich in der Baulast des Bundes befinden. Der Bestand wurde im Vergleich zum Jahr 2020 um zwei Bauwerke verringert. Einer der beiden Tunnel wurde im Zuge des Projekts Stuttgart 21 neu der Strecke 4805 zugeordnet. Diese befindet sich aktuell noch in Bau, weshalb dieses Bauwerk nicht berichtsrelevant ist. Ein weiterer Tunnel mit einer Länge von fünf Metern wurde neu als Bauwerk des Typs Durchlass definiert. Durch die beiden Bauwerke reduzierte sich die gesamte Tunnellänge um 318 m. Hinzu kamen weitere 22 m durch Aktualisierung der Bestandsdaten sowie eine weitere Abnahme um 474 m. Tabelle 2-5 zeigt die Entwicklung des Tunnelbestandes der DB Netz AG (Anzahl und Meter Tunnellänge).<sup>108</sup>

Jahr	Anzahl Tunnel DB Netz AG	Tunnellänge [m]
2021	745	597.739
2020	747	595.509
2019	745	592.877
2018	739	590.714
2017	719	550.715
2016	708	537.666

**Tabelle 2-5: Entwicklung Anzahl Tunnel sowie der Tunnellänge der DB Netz AG<sup>109</sup>**

<sup>107</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI): Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten. Internetquelle.

<sup>108</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 172.

<sup>109</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021. April 2022, S. 172.

### 3 Grundlagen und Stand der Forschung

Das bestehende Verkehrsnetz in Deutschland kann die ihm zugedachten Aufgaben nur übernehmen, wenn es regelmäßig erhalten - d. h. unterhalten (instandgehalten), instandgesetzt und erneuert - wird. Die Erhaltungsinvestitionen sichern den Bestand und die Leistungsfähigkeit der Verkehrsinfrastruktur. Da die zur Erhaltung der Verkehrsinfrastruktur zur Verfügung gestellten Haushaltsmittel knapp sind, müssen sie möglichst effektiv eingesetzt werden. Dafür gilt es, die angewandten Erhaltungsstrategien zu optimieren. Die Zusammenhänge der Einflussgrößen, der Erhaltungsstrategie und den Kosten sind in Abbildung 3-1 vereinfacht dargestellt.

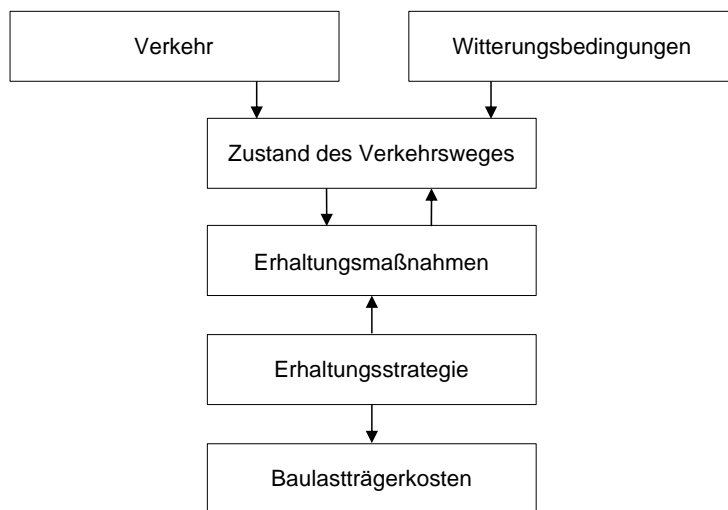


Abbildung 3-1: Einflussgrößen

Der Zustand des Verkehrsweges oder eines Objekts wird durch den Verkehr (Nutzungsintensität) sowie durch die Witterungsbedingungen beeinflusst. Um das Objekt in einem funktionsfähigen Zustand zu halten bzw. zurückzusetzen, sind Erhaltungsmaßnahmen notwendig. Die Durchführung dieser Erhaltungsmaßnahmen wird durch die Erhaltungsstrategie bestimmt. Die Erhaltungsstrategie bestimmt dabei die Häufigkeit der Maßnahmen und hat somit direkten Einfluss auf die Baulastträgerkosten.

#### 3.1 Begriff der Instandhaltung

Die DIN 31051 „Grundlagen der Instandhaltung“ sowie die DIN EN 13306 „Begriffe der Instandhaltung“ definieren in Deutschland die Grundlagen der Instandhaltung und stellen die wichtigsten Regelwerke in diesem Bereich dar.<sup>110 111</sup> „Instandhaltung“ gilt als Oberbegriff für alle Handlungen, die den Alterungsprozess beeinflussen. Diese Maßnahmen können sowohl die Erhaltung des Ist- Zustandes als auch die Rückführung in den entsprechenden Soll-Zustand sein.

Bauwerke unterliegen während ihrer Nutzung Alterungsprozessen. Wenn die Funktionsfähigkeit und die Betriebsfähigkeit des Gebäudes oder einzelner Komponenten nicht mehr gegeben sind,

<sup>110</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012.

<sup>111</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN EN 13306:2018-02 Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017. Berlin 2018.

muss diesen materiellen Abnutzungserscheinungen durch geeignete Instandhaltungsmaßnahmen entgegengewirkt werden. Oberstes Ziel der Instandhaltung ist die möglichst lange Bewahrung des Soll-Zustandes.<sup>112</sup> Jedes Bauteil unterliegt dabei einer eigenen Instandhaltungsstrategie, je nachdem welchen Einfluss dessen Ausfall auf das Gesamtsystem hat.<sup>113</sup>

### 3.1.1 Maßnahmen der Instandhaltung

Grundsätzlich lassen sich die Instandhaltungsarten in zwei Richtungen aufteilen. Auf der einen Seite kann durch die Änderung inhärenter Funktionssicherheitsmerkmale eine Verbesserung gegenüber dem Ausgangszustand einer Einheit erreicht werden. Auf der anderen Seite müssen diese Maßnahmen nicht unbedingt durchgeführt werden, wodurch es eben nicht zu einer Änderung inhärenter Funktionsmerkmale dieser Einheit kommt.

Die DIN 31051 legt die Grundlagen der Instandhaltung fest. Sie definiert den Begriff Instandhaltung als „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann“ und gliedert diesen in die vier Grundmaßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung (vgl. Abbildung 3-2).<sup>114</sup>

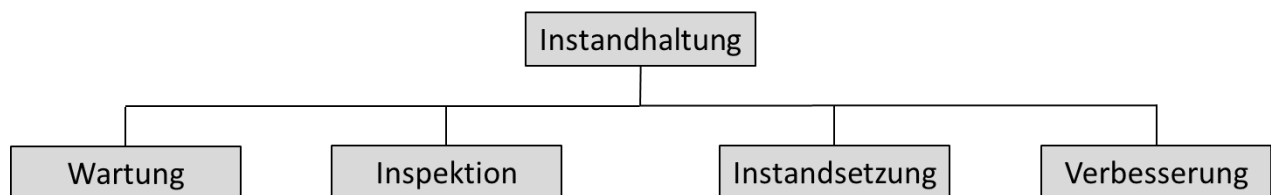


Abbildung 3-2: Gliederung der Instandhaltung nach DIN 31051<sup>115</sup>

Als Wartung werden Maßnahmen definiert, die der Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats dienen. Sie zählt nach DIN 13306 zur präventiven Instandhaltung. Zu ihr zählen Maßnahmen wie z.B. Instandhalten von Verkehrszeichen, Instandhalten von Lichtsignalanlagen sowie die Straßenreinigung- und -pflege (z.B. Fahrbahnränder und Standstreifen kehren, Straßenabläufe reinigen, Brückenbauwerke reinigen etc.).<sup>116</sup> <sup>117</sup> Unter den Begriff Inspektion fallen nach DIN 31051 alle „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Einheit (...)“. Unter Instandsetzung werden physische Maßnahmen zusammengefasst, die ausgeführt werden, um ein Bauteil wieder in seinen funktionsfähigen Soll-

<sup>112</sup> Vgl. Strunz, Matthias: Instandhaltung- Grundlagen, Strategien, Werkstätten. Berlin 2012, S. 2.

<sup>113</sup> Vgl. Wilhelm, Martin: Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Berlin 2011, S. 1.

<sup>114</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012. S. 4.

<sup>115</sup> Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012. S. 4.

<sup>116</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb (Hrsg.): Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen – Leistungsbereich 3: Wartung und Instandhaltung der Straßenausstattung. Bonn 2021. S. 50-62.

<sup>117</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb (Hrsg.): Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen – Leistungsbereich 4: Reinigung. Bonn 2021. S. 64-67.

Zustand zurückzusetzen. Durch Instandsetzung wird der Gebrauchswert eines Bauwerks oder einer Anlage deutlich angehoben. Die Verbesserung beschreibt die „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Zuverlässigkeit und/ oder Instandhaltbarkeit und/ oder Sicherheit einer Einheit, ohne ihre ursprüngliche Funktion zu ändern“<sup>118</sup>. Sie verändert somit Funktionsfähigkeit des Ist-Zustands über den ursprünglichen Soll-Zustand hinaus.

Bei einer reinen Instandsetzung wird zwar die technische Gesamtnutzungsdauer verlängert, allerdings wird der Zustand nicht den steigenden Ansprüchen der Nutzer gerecht, da die Bauteile der Immobilie nur auf den Stand der Technik zum Zeitpunkt der Fertigstellung instandgesetzt werden. Eine Verbesserung bewirkt eine Verringerung der Differenz zwischen den damaligen und den aktuellen Ansprüchen der Nutzer, d.h. die Bauteile werden über den damaligen Stand der Technik hinaus instandgesetzt. Nur durch Modernisierung der verbrauchten Bauteile wird eine Immobilie den steigenden Anforderungen der Nutzer gerecht. Modernisierungen werden unabhängig von der Lebensdauer des Bauteils durchgeführt.<sup>119</sup>

Für Straßen kann ergänzend zu den Begrifflichkeiten aus der DIN 31051 auf Basis der Definitionen der „Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten“ (ASB-ING) folgende Unterteilung vorgenommen werden:

Bauliche Erhaltung	Bauliche Unterhaltung	Betriebliche Unterhaltung
		Bauliche Unterhaltung
	Instandsetzung	
	Erneuerung	

**Abbildung 3-3: Begriff Erhaltung nach ASB-ING<sup>120</sup>**

Maßnahmen der baulichen und betrieblichen Unterhaltung sind innerhalb der Formel 2-1 den Betriebskosten zuzuordnen. Diese sogenannten Betriebsinstandsetzungen dienen dafür, die Lebensdauer des Bauteils zu verlängern, ohne dabei mit einer Wertsteigerung einherzugehen. Hierunter fallen „bauliche Maßnahmen kleineren Umfangs zur Substanzerhaltung von Verkehrsflächen, die mit geringem Aufwand in der Regel sofort nach dem Auftreten eines örtlich begrenzten Schadens von Hand oder maschinell ausgeführt werden (z.B. Flickarbeiten, Verfüllen von Rissen usw.)“.<sup>121</sup>

Der Instandsetzung sind bauliche Maßnahmen größeren Umfangs zuzuordnen, „die der Wiederherstellung des planmäßigen Zustandes eines Bauwerks oder seiner Bauteile dienen“<sup>122</sup>. Diese Definition kann mit der Ersatzinstandsetzung aus Kapitel 2.3 gleichgesetzt werden. Die

<sup>118</sup> Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012. S. 6.

<sup>119</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaft in Praxis, Forschung und Lehre. In: Bauingenieur, Band 90. Ausgabe 03/2015. S. 7-8.

<sup>120</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Abteilung Straßenbau (Hrsg.): ASB – Anweisung Straßeninformationsbank – Segment: Bauwerksdaten. S. 92-93.

<sup>121</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Abteilung Straßenbau (Hrsg.): ASB – Anweisung Straßeninformationsbank – Segment: Bauwerksdaten. S. 93.

<sup>122</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Abteilung Straßenbau (Hrsg.): ASB – Anweisung Straßeninformationsbank – Segment: Bauwerksdaten. S. 92.

Bauwerkserneuerung bezeichnet die Errichtung eines Bauwerks „ohne die Wiederverwendung von Bauteilen des Vorläuferbauwerks“. <sup>123</sup>

Auf Basis der gezeigten Definitionen aus der Literatur lässt sich der Begriff Instandsetzung für diese Arbeit wie folgt abgrenzen:

*Unter Instandsetzung werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die aufgrund des Erreichens der technischen Lebensdauer der Rückführung des Ist-Zustandes einer Betrachtungseinheit in den ursprünglichen Soll-Zustand (aktueller Stand der Technik) dienen und somit eine Veränderung des Wertes der Betrachtungseinheit mit sich bringen. Die Lebensdauer des Bauteils beginnt nach der Maßnahme wieder bei null.*

Bei dieser vorgenommenen Definition des Begriffs der Instandsetzung ist zu beachten, dass das Bauteil nicht wieder in den ursprünglichen Ausgangszustand zurückgesetzt wird, sondern dem zu dem Zeitpunkt der Instandsetzung aktuellen Stand der Technik. Es wird aber kein Bauteil eingebaut, dessen Spezifikationen über dem aktuellen Stand der Technik liegen, da es sich in diesem Fall um eine Verbesserung handeln würde.

### **3.1.2 Instandhaltungsstrategien**

Die Instandhaltungsstrategie definiert die „Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele“<sup>124</sup>. Die Aufgabe eines erfolgreichen Instandhaltungsmanagements ist die Einhaltung der Instandhaltungsstrategie in Form von bestimmten, vorher definierten Zielen. Zum einen soll die Verfügbarkeit des Objekts mit den geforderten Funktionen und den geringsten Kosten gesichert werden. Zum anderen muss dies unter Einhaltung der mit dem Objekt einhergehenden Anforderungen (Sicherheit, Personal, Umwelt etc.) geschehen.<sup>125</sup> Zwar entstehen beim „Ausfall“ z.B. von einer Brücke keine direkt quantifizierbaren Verluste wie dies in produzierenden Wirtschaftsbetrieben der Fall ist, allerdings verursachen derartige Sperrungen von Teilstrecken einen erheblichen volkswirtschaftlichen Schaden (vgl. Kapitel 2.2). Instandsetzungsmaßnahmen dienen der Wiederherstellung der uneingeschränkten Nutzung des Bauwerks und sind somit auch als Investitionen anzusehen. Daher sollten sie genauso wie die Erstinvestitionskosten bereits in frühen Planungsphasen berücksichtigt und entsprechend optimiert werden.

Mit geeigneten Instandhaltungsmaßnahmen bzw. –strategien wird das primäre Ziel verfolgt, die Abnutzungsgeschwindigkeit zu verzögern und dem Verfall bzw. der Zerstörung entgegenzuwirken, um eine möglichst störungsfreie Nutzung unter Einhaltung eines optimalen Kostenniveaus des entsprechenden Bauwerks zu gewährleisten. Instandhaltungsziele können bspw. auch einen Fokus auf die Verfügbarkeit, die Kostenreduzierung/-optimierung, die Werterhaltung, die Produktqualität, die Sicherheit, die Brauchbarkeitsdauer legen oder Ziele des

---

<sup>123</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: Abteilung Straßenbau (Hrsg.): ASB – Anweisung Straßeninformationsbank – Segment: Bauwerksdaten. S. 92.

<sup>124</sup> Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017. Berlin 2018. S. 5.

<sup>125</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017. Berlin 2018. S. 5.

Umweltschutzes verfolgen.<sup>126</sup> Bei der Wahl der geeigneten Instandhaltungsstrategie sind u.a. gesetzliche, sicherheitstechnische sowie produktionsrelevante Aspekte zu berücksichtigen.<sup>127</sup> Daher gibt es auch keine einheitliche Instandhaltungsstrategie, welche für alle Anlagen angewendet werden kann. Vielmehr hängt die Wahl der richtigen Instandhaltungspolitik von verschiedenen Aspekten ab und unterscheidet sich von Unternehmen zu Unternehmen.<sup>128</sup>

Die vereinbarte Instandhaltungsstrategie gibt vor, welche Maßnahmen durchgeführt werden sowie deren Zeitpunkt und Häufigkeit.<sup>129</sup> Die Maßnahmen der Instandhaltung lassen sich aus zeitlicher Sicht in systematische und unsystematische unterteilen. Während bei einem unsystematischen Ansatz die Maßnahmen nach Fehlererkennung ausgeführt werden, handelt die systematische Instandhaltung nach festen vorgegebenen Intervallen und Parametern.<sup>130</sup>

Aus diesem beschriebenen Ansatz lassen sich auf oberster Ebene zwei Instandhaltungsstrategien unterscheiden. Der Ansatz der systematischen Instandhaltung bildet die Grundlage für die präventive Instandhaltungsstrategie. Die korrektive Instandhaltungsstrategie basiert auf dem Ansatz der unsystematischen Instandhaltung.<sup>131</sup>

Die präventive Instandhaltung wird weiterhin in die vorausbestimmte sowie in die zustandsorientierte Instandhaltung unterteilt. Dabei wird die vorausbestimmte Instandhaltung nach festgelegten Kriterien durchgeführt ohne vorherige Zustandsermittlung, während die zustandsorientierte Instandhaltung eine Kombination aus Zustandsüberwachung und Konformitätsprüfung bildet und die daraus resultierenden Instandhaltungsmaßnahmen beinhaltet. Bei der zustandsorientierten Instandhaltung wird auf einer dritten Ebene zwischen der voraussagenden und nicht voraussagenden Instandhaltung differenziert. Die voraussagende Instandhaltung basiert auf der Ableitung bekannter Eigenschaften oder wiederholten Analysen sowie der Bestimmung von wichtigen Parametern, welche die Abnutzung des Bauteils charakterisieren. Aus diesen Daten wird eine Vorhersage abgeleitet, nach welcher die Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden.<sup>132</sup> Das Ausfallrisiko bei einer präventiven Instandhaltungsstrategie ist wesentlich geringer als bei einer korrektiven Instandhaltung, da die Maßnahmen über die Zeit geplant werden und so die benötigten Ressourcen rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden können.<sup>133</sup>

---

<sup>126</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.) DIN EN 13306:2018-02, Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung; Dreisprachige Fassung EN 13306:2017. Berlin 2018. S. 9.

<sup>127</sup> Vgl. Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010. S. 26.

<sup>128</sup> Vgl. Matyas, Kurt: Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. Industrie Management 18 (2002). S. 13.

<sup>129</sup> Vgl. Matyas, Kurt: Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien. Industrie Management 18 (2002). S. 13.

<sup>130</sup> Vgl. Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010, S. 26.

<sup>131</sup> Vgl. Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 26.

<sup>132</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 13306:2012-09 Instandhaltung- Begriffe der Instandhaltung. Berlin 2015, S.14-15.

<sup>133</sup> Vgl. Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010, S. 28.



In Abbildung 3-4 ist die Ausnutzung des Abnutzungsvorrates bei der vorausbestimmten Instandhaltung dargestellt.

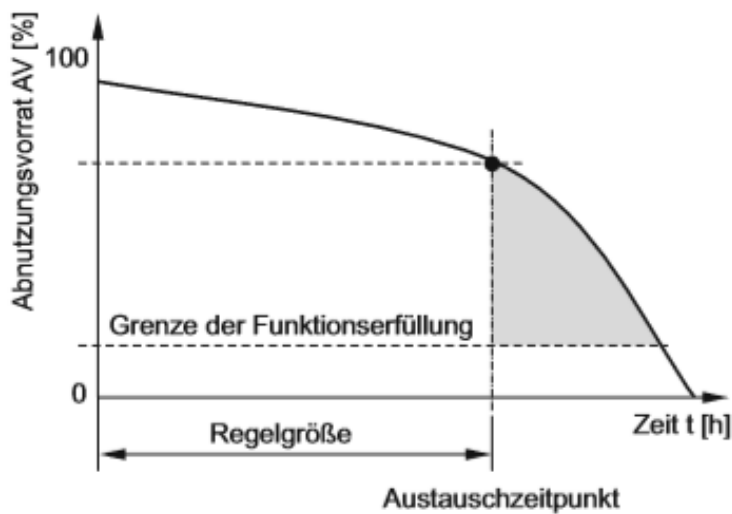


Abbildung 3-4: Regelgröße Zeit bei der vorausbestimmten Instandhaltung<sup>134</sup>

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei dieser Instandhaltungsstrategie der Abnutzungsvorrat eines Bauteils nicht komplett ausgenutzt wird, da die Steuergröße die Zeit ist. Im Gegensatz dazu ist in Abbildung 3-5 die Ausnutzung des Abnutzungsvorrates für die zustandsorientierte Instandhaltung dargestellt. Hier wird der Instandsetzungszeitpunkt über den Zustand (Abnutzungsvorrat) abgeleitet.<sup>135</sup>

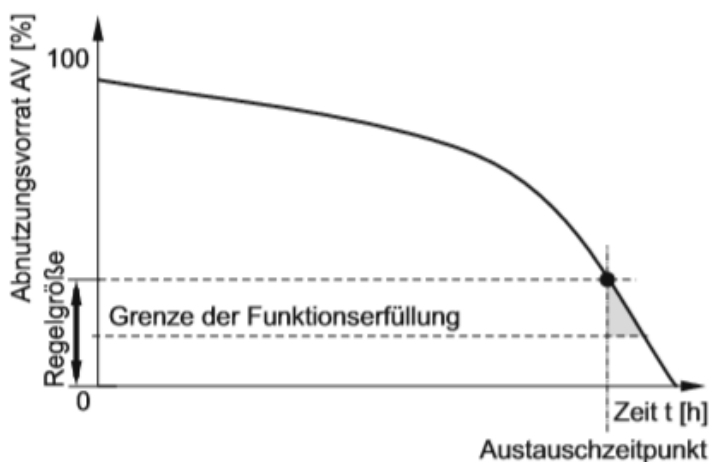


Abbildung 3-5: Regelgröße Abnutzungsvorrat bei der zustandsorientierten Instandhaltung<sup>136</sup>

<sup>134</sup> Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010, S. 29.

<sup>135</sup> Vgl. Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 30.

<sup>136</sup> Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010, S. 30.

Die korrektive Instandhaltung wird in die aufgeschobene und sofortige korrektive Instandhaltung untergliedert. Im Gegensatz zur sofortigen Instandhaltung, welche direkt nach Fehlererkennung ausgeführt wird, um weitere Folgen zu vermeiden, wird die aufgeschobene Instandhaltung nicht unmittelbar nach einem Ausfall ausgeführt, sondern nach festgelegten Instandhaltungsregeln zurückgestellt. Bei der korrektiven Instandhaltung wird demnach einem Ausfall nicht vorgebeugt, sondern lediglich darauf reagiert.<sup>137</sup> Durch diese Instandhaltungsstrategie wird die Betrachtungseinheit bis zum Schadensfall betrieben und so der vorhandene Abnutzungsvorrat eines jeden Bauteils komplett ausgenutzt. Allerdings führt diese Instandhaltungsstrategie „zu der höchsten Ausfallzeit und zu den höchsten Ausfallfolgekosten“ und ist mit einer mangelhaften Planbarkeit von Instandhaltungsmaßnahmen verbunden.<sup>138</sup>

Aus den aufgeführten Erläuterungen zu den verschiedenen Instandhaltungsstrategien kann abgeleitet werden, dass die Lebensdauer eines Bauteils und damit der Zeitpunkt der Instandsetzung maßgeblich von der gewählten Instandhaltungsstrategie abhängig ist. Diese muss daher für die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten berücksichtigt werden.

In Abbildung 3-6 sind die verschiedenen Instandhaltungsarten nach DIN EN 13306 in einer Übersicht dargestellt.

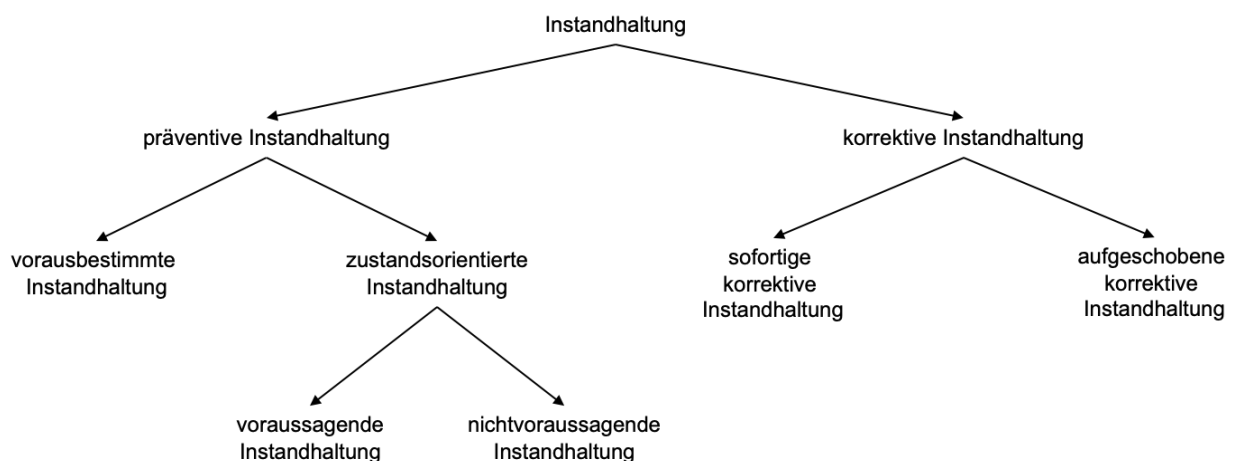


Abbildung 3-6: Überblick über die verschiedenen Instandhaltungsarten nach DIN EN 13306<sup>139</sup>

### 3.1.3 Instandhaltungsstrategien auf Basis von Kritikalität

ZIEGEL<sup>140</sup> entwickelte Entscheidungskriterien, mit denen eine optimale Mittelzuweisung zum Erhalt der Funktionsfähigkeit der Infrastruktur möglich ist. Hierfür untersuchte er sowohl die Bauwerke als auch deren volkswirtschaftliche Bedeutung. Die zur Verfügung stehenden Mittel

<sup>137</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 13306:2012-09 Instandhaltung- Begriffe der Instandhaltung. Berlin 2015, S.14-15.

<sup>138</sup> Vgl. Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010, S. 28.

<sup>139</sup> Schenk, Michael: Instandhaltung technischer Systeme. Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs. Berlin Heidelberg 2010, S. 23.

<sup>140</sup> Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.

sollen nach volkswirtschaftlicher Bedeutung innerhalb einer Infrastruktursparte zugewiesen und verteilt werden, um die Nutzungseinschränkungen durch die Maßnahmen der Erhaltung zu minimieren. Das von ihm entwickelte Modell hat die Aufgabe, eine Handlungsempfehlung für das Management zu erzeugen. Auf dieser Basis soll die Verteilung der finanziellen Mittel vorgenommen werden. Das Modell geht davon aus, dass es nicht eine Instandhaltungsstrategie für das gesamte Objekt gibt, sondern dass jeder Betrachtungseinheit des Objekts eine Instandhaltungsstrategie auf Basis ihrer Kritikalität zugeordnet wird, so dass eine Mischstrategie für das gesamte Objekt entsteht.<sup>141</sup> ZIEGEL definierte für die Bauwerke Straße, Brücke und Tunnel Funktionseinheiten, welche als eine Einheit bestehend aus mindestens einem Teil verstanden werden, die sich durch ihre Funktion abgrenzen.<sup>142</sup> Den einzelnen Funktionseinheiten werden verschiedene Strategien entsprechend ihrer Kritikalität zugeordnet. Das Modell berücksichtigt vier verschiedene Instandhaltungsstrategien, welche den einzelnen Funktionseinheiten zugeordnet werden, so dass der Gesamtnutzen maximiert wird. Die verschiedenen Strategien lassen sich hierarchisch gliedern und mit den Kritikalitätsmaßen verknüpfen:

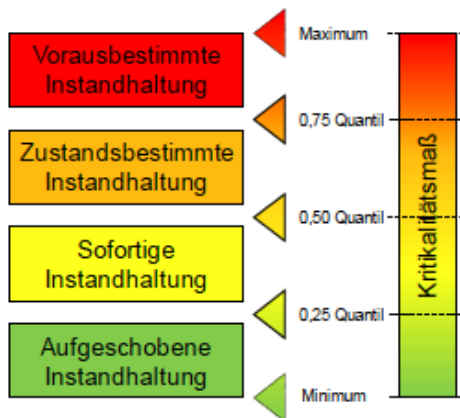


Abbildung 3-7: Zusammenhang des Kritikalitätsmaßes und der Instandhaltungsstrategien<sup>143</sup>

Auf Grundlage der entwickelten Kritikalitätsmaße lassen sich anhand der vorab definierten Instandhaltungsstrategien Empfehlungen für eine sinnvolle Instandhaltung ableiten. Die Ergebnisse von ZIEGEL sollen im Rahmen des in Kapitel 4 entwickelten Modells berücksichtigt werden, um auch eine betriebswirtschaftliche Bewertung vornehmen zu können.

<sup>141</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 268.

<sup>142</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 129.

<sup>143</sup> Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 166.

### 3.1.4 Investitionen in die Verkehrsinfrastruktur

Laut aktuellem Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2020 des Deutschen Bundestages beziffern sich die Investitionen für die Bundesfernstraßen auf 7.905,8 Mio. Euro. Davon wurden 4.453,1 Mio. Euro in die Erhaltung investiert.<sup>144</sup>

Im Jahr 2018 lag der Anteil an Erhaltungsausgaben für Ingenieurbauwerke bei etwa 36 % der Gesamterhaltungsausgaben. Dies entspricht einer Summe von 1,424 Mrd. Euro, welche für die Substanzerhaltung von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken zur Verfügung stand.<sup>145</sup> Abbildung 3-8 zeigt die Entwicklung der Investitionen in Bundesfernstraßen in den Jahren 2009-2019 getrennt nach Neubau und Erhaltung. Ab 2011 sind die Investitionen in die Erhaltung der Bundesfernstraßen kontinuierlich gestiegen und liegen seit 2013 über den Ausgaben für den Neubau.

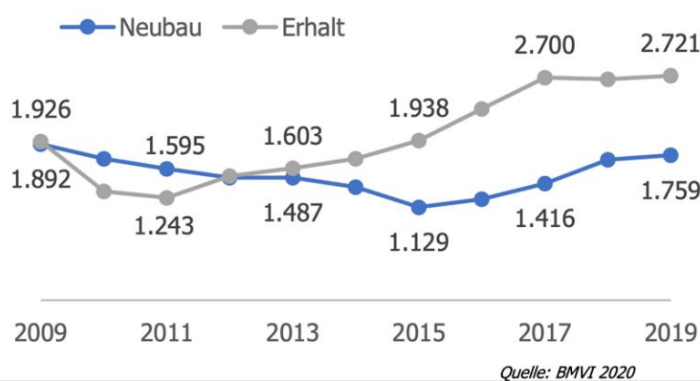


Abbildung 3-8: Entwicklung der Investitionen von Bundesfernstraßen getrennt nach Neubau und Erhalt<sup>146</sup>

Die Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung gibt Auskunft über die getätigten Investitionen der letzten 5 Jahre der DB Netz AG in das Bestandsnetz. Abbildung 3-9 zeigt die getätigten Investitionen von 2015 bis 2020 nach Projektabschnitten. Durchschnittlich stiegen die jährlichen Investitionen jedes Jahr um ca. 9,3 % an. Dabei entfiel ein Wachstum von durchschnittlich 5,5 % auf die Jahre 2015-2018. In den Jahren 2018-2020 wurden durchschnittlich 15,4 % der Investitionen getätigt. Die deutliche Erhöhung der Investitionen im Bereich des Tunnelbaus ab 2015 ist auf den Baufortschritt beim Projekt „Stuttgart 21“ zurückzuführen. Für erneuerte Brückenbauwerke betrug der Anstieg der Investitionen durchschnittlich 17,7 % jährlich.<sup>147</sup>

<sup>144</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2020. Berlin, 2022, S.176.

<sup>145</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2020. Berlin 2022, S.177.

<sup>146</sup> ProMobilität – Initiative für Verkehrsinfrastruktur e.V. (Hrsg.): Zahlen, Daten, Fakten. Verkehrsetat 2021. Oktober 2020. Internetquelle.

<sup>147</sup> Vgl. Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2020. April 2021, S. 40.

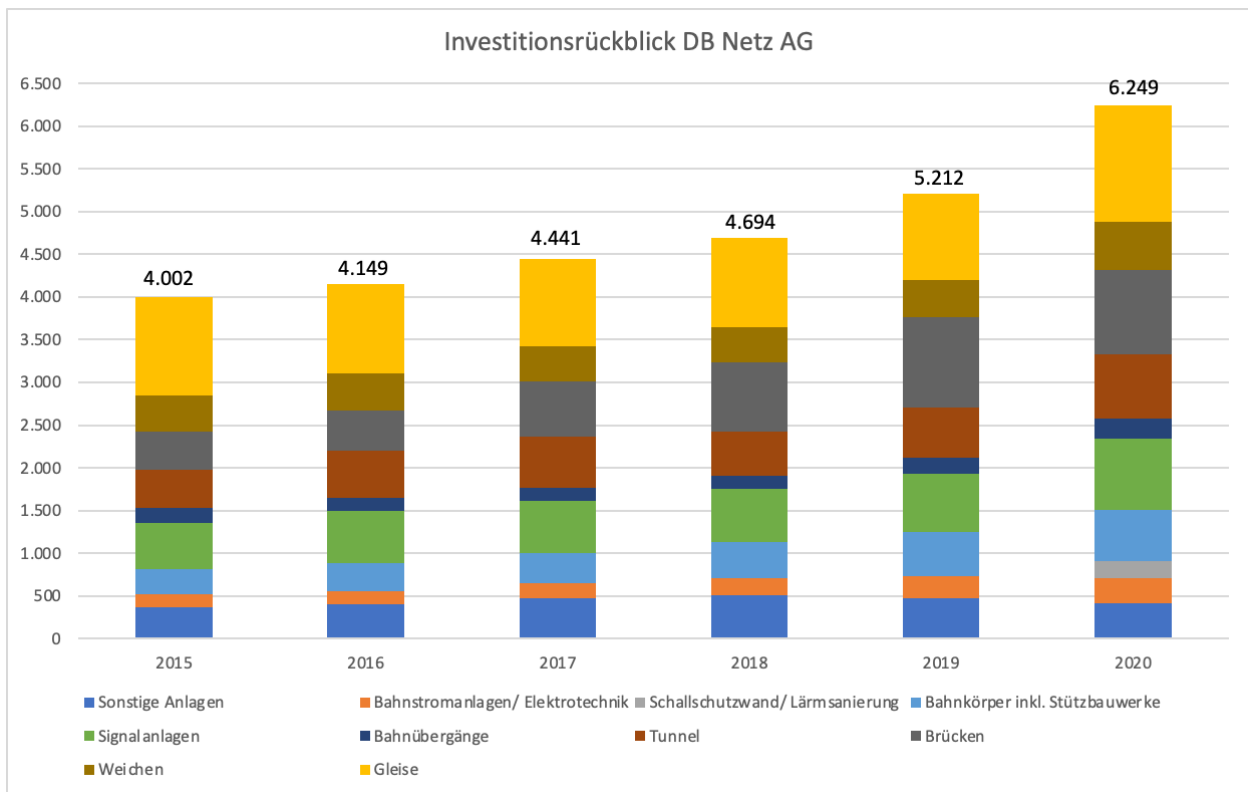


Abbildung 3-9: Investitionen der DB Netz AG in das Bestandsnetz 2015-2020<sup>148</sup>

## 3.2 Normen und Richtlinien zur Instandhaltung der Straßenverkehrsinfrastruktur

Die im Folgenden aufgeführten Richtlinien und Normen gelten für die Straßenverkehrsinfrastruktur, nicht aber für den Verkehrsweg Schiene. Für die Schieneninfrastruktur haben Eisenbahnunternehmen innerbetriebliche Regelwerke erlassen, um die gesetzlichen Vorgaben zu konkretisieren. Insbesondere hat die DB AG ein umfangreiches innerbetriebliches Richtlinienwerk für alle bundeseigenen Eisenbahnen geschaffen. Diese Regelwerke sind nicht frei abrufbar und konnten im Rahmen der Arbeit nicht untersucht werden. Für alle nicht bundeseigenen Eisenbahnen sind durch den Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) eigene Regelwerke verfasst worden.

### 3.2.1 Bauwerksprüfungen nach DIN 1076

Die DIN 1076 gilt für Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen und regelt ihre regelmäßige Prüfung und Überwachung hinsichtlich ihrer Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit. Durch diese Prüfungen und Überwachungen können eingetretene Mängel oder Schäden rechtzeitig erkannt und bewertet werden. Es können auf ihrer Basis geeignete Maßnahmen definiert und ausgeführt werden, um die Verkehrssicherheit des jeweiligen

<sup>148</sup> Deutsche Bahn AG: Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung- Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2020. April 2021, S. 40.

Bauwerks zu erhalten. Es werden nicht die Beseitigung der Mängel und Schäden, sondern ausschließlich die durchzuführenden Prüfungen und Überwachungen geregelt.<sup>149</sup>

Nach der DIN 1076 zählen zu den Ingenieurbauwerken, welche den regelmäßigen Kontrollen zu unterziehen sind, Brücken, Verkehrszeichenbrücken, Tunnel, Trogbauwerke Stützbauwerke, Lärmschutzbauwerke sowie Bauwerke, für die ein Einzelstandsicherheitsnachweis erforderlich ist (sonstige Ingenieurbauwerke).<sup>150</sup>

Die DIN 1076 gibt an, Ingenieurbauwerke in regelmäßigen Abständen hinsichtlich der Kriterien Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit zu prüfen mit dem Ziel, möglich eingetretene Mängel bzw. Schäden frühzeitig zu erkennen, damit rechtzeitig geeignete Maßnahmen ergriffen werden können, so dass größere Schäden vermieden werden und die Verkehrssicherheit gewährleistet ist. Dabei unterscheidet sie zwischen Hauptprüfungen, einfachen Prüfungen, Prüfungen aus besonderem Anlass (Sonderprüfung) sowie Prüfungen nach besonderen Vorschriften. Hauptprüfungen sind jedes sechste Jahr durchzuführen, wobei die erste Hauptprüfung vor Abnahme der Bauleistung durchzuführen ist und die zweite Hauptprüfung vor Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung stattzufinden hat. Lokalisierte Mängel bzw. Schäden sind im Prüfbericht zu kennzeichnen und bei den darauffolgenden einfachen Prüfungen oder in engeren Zeitabständen erneut zu prüfen.<sup>151</sup>

Kosten für die Prüfungen von Ingenieurbauwerken nach DIN 1076 werden in dieser Arbeit nicht behandelt, da diese Kosten den Betriebskosten zugeordnet werden. Hier wird auf die Arbeit von OSTERRIED<sup>152</sup> verwiesen.

### **3.2.2 Bewertung des Bauwerkszustandes nach RI-EBW-PRÜF**

Die „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076“ (RI-EBW-PRÜF) wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur herausgegeben und regelt die Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken im Rahmen der durchgeführten Prüfungen nach DIN 1076.<sup>153</sup> Auf Grundlage der Bauteilbewertung hinsichtlich Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit kann mit Hilfe des Prüfprogramms SIB-Bauwerke eine Zustandsnote der jeweiligen Bauteilgruppe ermittelt werden, die die Schwere der Schädigung wiedergibt.

---

<sup>149</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 1076:1999-11 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung. Berlin 1999, S. 2.

<sup>150</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 1076:1999-11 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung. Berlin 1999, S. 2.

<sup>151</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 1076:1999-11 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung. Berlin 1999, S. 3-5.

<sup>152</sup> Vgl. Osterried, Julia: Betriebskosten der Straßenverkehrsinfrastruktur als Funktion von Objekt- und Netzeigenschaften. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.

<sup>153</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): RI-BW-PRÜF:2017 – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. S. 5.

Durch die Zustandsnoten eines Bauwerks kann keine direkte Aussage über den Umfang der Schäden oder die Kosten notwendiger Instandsetzungsmaßnahmen getroffen werden. Beispielsweise kann eine Brücke mit einem defekten Geländer eine Zustandsnote von 3,0 haben, da ihre Verkehrssicherheit nicht mehr in vollem Umfang gegeben ist. Das bedeutet nicht, dass auch Maßnahmen hinsichtlich der Standsicherheit notwendig sind. Demzufolge ist allein aus der Zustandsnote nicht ersichtlich, wie hoch die Instandsetzungskosten sein werden. Es lässt sich aus ihr erkennen, ob ein aktueller Instandsetzungsbedarf besteht und welche Art von Maßnahmen notwendig sind, um das Bauwerk weiterhin in einem nicht gefährdeten Zustand zu erhalten.<sup>154</sup>

### **3.2.3 Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln**

Die „Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT) ist als eines der wichtigsten Werke für die technischen Anlagen im Tunnel zu sehen. Hier werden allgemeine Kriterien für die Planung der Ausstattung sowie den Betrieb von Straßentunneln zur Verfügung gestellt. In dieser Richtlinie werden die Bereiche Organisation, Tunnelsicherheit sowie sämtliche technische Einrichtungen und Ausstattungen inkl. der Steuerung beschrieben. Sie soll eine sichere Verkehrsführung gewährleisten und den Tunnelnutzer schützen. Sie ist für alle Straßentunnel ab einer geschlossenen Länge von 80 m anzuwenden. Als Straßentunnel gelten auch teilabgedeckte unter- oder oberirdische Verkehrswege, oberirdische Einhausungen von Straßen, Kreuzungsbauwerken mit anderen Verkehrswegen sowie Galeriebauwerke. Die RABT definiert Maßnahmen im Zuge der Inbetriebnahme sowie von Veränderungen und beschreibt darüber hinaus die Organisation und den Betrieb von Straßentunneln sowie die Anforderungen an die technischen Einrichtungen im Tunnel.<sup>155</sup>

### **3.2.4 Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen**

Die „Richtlinie für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen“ (RPE-Stra) umfasst insbesondere alle verwaltungstechnischen Planungsstufen einer effizienten und systematischen Straßenerhaltung. Sie dient der Vereinheitlichung der Erhaltungsplanungen für die Bundesfernstraßen über die einzelnen Bundesländer und zeigt die notwendigen Schritte für eine systematische Planung von Erhaltungsmaßnahmen.<sup>156</sup>

Die RPE-Stra gliedert die Erhaltung in die betriebliche Unterhaltung und die bauliche Erhaltung. Sie umfasst alle Maßnahmen, welche der baulichen Unterhaltung im Sinne von Instandsetzung und Erneuerung zuzuordnen sind. Maßnahmen, welche unter den Unterhaltungs- und Betriebsdienst (Instandhaltung) fallen, werden in dieser Richtlinie nicht behandelt.<sup>157</sup> Hier lässt sich erkennen, dass die Begriffe dieser Richtlinie nicht mit den Begrifflichkeiten der DIN 31051

---

<sup>154</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): RI-BW-PRÜF:2017 – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. S. 14.

<sup>155</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2016, S. 1–3.

<sup>156</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RPE-Stra 01 - Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: Köln 2001.

<sup>157</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RPE-Stra 01 - Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: Köln 2001. S. 16-17.

übereinstimmen. Die DIN 31051 verwendet den Begriff Instandhaltung als Oberbegriff für die Maßnahmen Wartung, Inspektion, Verbesserung und Instandsetzung. Nach den Definitionen der RPE-Stra sind Maßnahmen der Instandsetzung aber von den anderen Begrifflichkeiten zu trennen.

### **3.2.5 FGSV AP 9 – Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung**

Die Arbeitspapiere 9 enthalten die Ergebnisse des Arbeitsausschusses „Systematik der Straßenerhaltung“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Hier wird für die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) der Fahrbahnoberflächen sowie für die Erhaltungsplanung von Straßen eine einheitliche Gliederung vorgestellt. Diese setzt sich aus sogenannten verschiedenen „Reihen“ zusammen, welche in Abbildung 3-10 dargestellt sind.<sup>158</sup>

---

<sup>158</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 - Gliederung. Ausgabe 2007.



Reihe	Ab-schnitt	Unter- abschnitt	Titel	Ersetzt folgende Teile der bisherigen Ausgabe		
<b>M</b>			<b>Meßtechnische Zustandserfassung</b>			
	<b>M 1</b>		<b>Vorbereitung</b> Vorbereitungen für die meßtechnische Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen)	Teil B, Abschnitt B 2		
	<b>M 2</b>		<b>Zustandserfassung</b> Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ebenheit im Längsprofil</li> <li>• Ebenheit im Querprofil</li> <li>• Griffigkeit</li> <li>• Substanzmerkmale (Oberfläche)</li> </ul>	Teil C, Abschnitt C 2		
<b>V</b>			<b>Visuelle Zustandserfassung</b>			
	<b>V 1</b>		<b>Vorbereitung</b> Vorbereitungen für die visuelle Zustandser- fassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen)	Teil B, Abschnitt B 2		
	<b>V 2</b>	<b>V2.1</b> <b>V2.2</b>	<b>Zustandserfassung</b> Außerortsstraßen, Asphalt Außerortsstraßen, Zementbeton	Teil C, Abschnitt C 1.1 Teil C, Abschnitt C 1.2		
<b>A</b>			<b>Auswertung</b>			
	<b>A 1</b>	<b>A1.1</b>	<b>Zustandsbewertung</b> Zustandsbewertung bei meßtechnischer Erfassung <b>A1.2</b> Zustandsbewertung bei visueller Erfassung <b>A1.3</b> Veranschaulichung und statistische Aufberei- tung von Zustandsdaten	Teil D		
		<b>A2</b>			<b>Datenorganisation und Historisierung</b> Hinweise zur Sammlung und Organisation von Zustandsdaten <b>A2.2</b> Grundsätze der Historisierung von Zustands- daten	Teil H 1
		<b>A2.1</b>				
<b>R</b>			<b>Rechnergestützte Erhaltungs- planung für Fahrbahnbefestigungen</b>			
	<b>R 1</b>		<b>Standardwerte der Programmkenngößen</b>			
	<b>R 2</b>		<b>Anforderungen an die Eingangsdaten</b>			
	<b>R 3</b>		<b>Ermittlung der Kostendaten</b>			
<b>S</b>			<b>Substanzwert (Bestand)</b>			

Abbildung 3-10: Gliederung der Zustandserfassung und –bewertung<sup>159</sup>

In der messtechnischen und visuellen Zustandserfassung werden die grundlegenden Daten für die Entscheidungen über Erhaltungsmaßnahmen gesammelt. Sie regeln die Verfahren der Zustandsmessung sowie deren Art und Ort der Anwendung.

In der Reihe A wird der Prozess der Zustandsbestimmung basierend auf den Ergebnissen der Zustandserfassung beschrieben. Die erfassten Zustandsmerkmale werden hinsichtlich ihrer Wirkung auf die vier Erhaltungsziele Verkehrssicherheit, Befahrbarkeit, Substanzerhalt und Umweltverträglichkeit beurteilt.<sup>160</sup>

<sup>159</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 - Gliederung. Köln 2007, S. 2.

<sup>160</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9/ A1.1. Köln 2001, S. 4.

In der Reihe R wird die Erhaltungsplanung beschrieben. Hier werden Anforderungen an Art, Ausprägung und konkrete Werte der erforderlichen Eingangsdaten für die rechnergestützte Erhaltungsplanung formuliert. Ziel ist es, eine gleiche Qualität der Ergebnisse zu gewährleisten.<sup>161</sup>

Die Reihe S enthält eine Bewertungsmöglichkeit für die Erhaltungsplanung.<sup>162</sup>

### **3.2.6 Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei Straßenbrücken**

Da Investitionen in Form von Erhaltungsausgaben ebenso wie Neubauten Investitionen in das Anlagevermögen des Bundes und somit eine langfristige Anlage von Kapital in Sachgüter darstellen, sind auch für Erhaltungsinvestitionen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchzuführen. Die „Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken“ (RI-WI-BRÜ) regelt die wirtschaftliche Beurteilung von Erhaltungsmaßnahmen bei Straßenbrücken. Sie beurteilt die Wirtschaftlichkeit nicht nur nach den Baukosten, sondern auch nach den Folgekosten. Ziel der Richtlinie ist es, durch ein objektbezogenes Verfahren die Wirtschaftlichkeit verschiedener Erhaltungsmaßnahmen zu bewerten.<sup>163</sup>

Der Anwendungsbereich dieser Richtlinie gilt für Straßenbrücken in der Baulast des Bundes. Sie ist anzuwenden bei Erhaltungsmaßnahmen mit einem Auftragsvolumen über 3 Mio. Euro (Erneuerungen bestehender Straßenbrücken, größere Instandsetzungsarbeiten) sowie bei Erhaltungsmaßnahmen, „deren Auftragsvolumen 50 % der reinen Baukosten des Bauwerks zum heutigen Preisstand übersteigt“.<sup>164</sup>

Für Erneuerungs-, Instandsetzungs- und Unterhaltungsmaßnahmen fallen im Bewertungszeitraum ausschließlich Ausgaben an. Diese Ausgaben setzen sich zusammen aus den Baukosten und den Unterhaltungskosten. Die Baukosten bestehen aus den reinen Baukosten (Instandsetzungs- oder Erneuerungskosten), den Kosten für Abbruch, Behelfe, Betriebserschwernisse und Verkehrsführung sowie den Verwaltungskosten. Hierbei werden die Verwaltungskosten in Höhe von 10 % der Instandsetzungskosten und der Kosten für Abbruch, Behelfe, Betriebserschwernisse und Verkehrsführung angenommen.<sup>165</sup> Die Unterhaltungskosten einer Straßenbrücke geben den Betrag an, „der im Bezugsjahr zur Verfügung stehen müsste, um

---

<sup>161</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9/ R1. Köln 2001, S. 5.

<sup>162</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9/ S. Köln 2003, S. 3.

<sup>163</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). 2007, S. 4.

<sup>164</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). 2007. S. 6.

<sup>165</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). 2007. S. 19.

innerhalb des Bewertungszeitraumes den Unterhaltsverpflichtungen nachkommen zu können“<sup>166</sup>. In der Richtlinie werden unterschiedliche Formeln zur Berechnung der Unterhaltungskosten gezeigt, abhängig davon, ob ausschließlich Instandsetzungsmaßnahmen, Erneuerungsmaßnahmen als Erstmaßnahme, Erneuerungsmaßnahmen als Zweitmaßnahme oder zwei Erneuerungsmaßnahmen im Bewertungszeitraum durchgeführt werden.<sup>167</sup>

### 3.3 Lebensdauer von Bauteilen

Auf Grund der hohen Kosten während der Gesamtnutzungsdauer und eines gestiegenen Nachhaltigkeitsbewusstseins wird ein immer größeres Augenmerk auf die Lebenszykluskosten gelegt. Zu den Lebenszykluskosten zählen neben den Kosten für die Herstellung des Bauwerks die bereits in Kapitel 2.3 eingeführten Kosten, die während der Nutzung anfallen sowie die Kosten für den Abbruch des Bauwerks. Die Gesamtkosten eines Bauwerks inkl. der Kosten während der Betriebsphase können die Herstellungskosten übersteigen. Daher ist es unerlässlich bereits in frühen Planungsphasen, wenn die Beeinflussbarkeit der Kosten noch am höchsten ist, die zukünftigen Investitionskosten zu ermitteln.

Um die Gesamtnutzungsdauer eines Objekts zu erreichen, ist es notwendig, verschiedene Bauteile während der Nutzung zu erneuern.<sup>168</sup> KORNBLUM hat dargelegt, dass die Berechnung der Instandsetzungskosten immer in Bezug auf die einzelnen Bauteile erfolgt und nicht auf die Gesamtnutzungsdauer des Objekts, so dass theoretisch eine unendliche Nutzungsdauer der Immobilie erreicht werden kann.<sup>169</sup> Die Bauteile eines Objekts stellen somit die kostenverursachenden Elemente dar. Für eine wirtschaftlich optimale Instandhaltung sind möglichst genaue Kenntnisse über die Lebensdauern von Bauteilen notwendig. Die zur Erhaltung bzw. Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Objekten erforderlichen Maßnahmen werden beispielhaft an einem in Abbildung 3-11 dargestellten Objekt durchgeführt.

---

<sup>166</sup> Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). 2007. S. 20.

<sup>167</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/ Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ). 2007, S. 21-22.

<sup>168</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S.93.

<sup>169</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S.80.

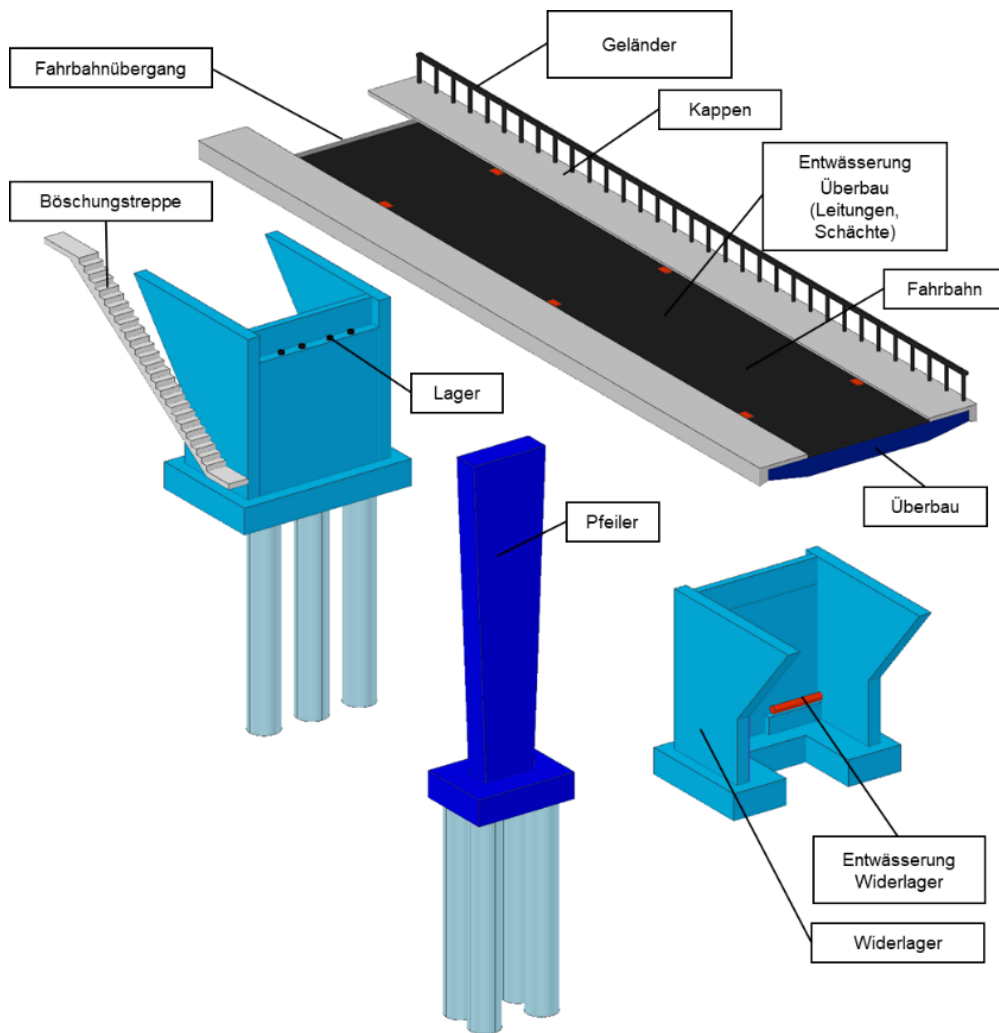


Abbildung 3-11: Objekt O mit Bauteilen B als Untersuchungsgegenstand<sup>170</sup>

### 3.3.1 Abnutzungsvorrat

Der Abnutzungsvorrat beschreibt das Potential zur Funktionserfüllung einer Betrachtungseinheit, welches einer Einheit innewohnt. Der Abbau dieses Abnutzungsvorrates wird durch chemische und/ oder physikalische Vorgänge verursacht. Damit sind Vorgänge gemeint, die durch verschiedene Beanspruchungen während der Nutzung entstehen. Beispiele hierfür sind Reibung, Korrosion, Ermüdung oder Alterung. Bei Errichtung eines Gebäudes erhält der Abnutzungsvorrat seine vollumfängliche Funktionserfüllung unter den festgelegten Anforderungen. Diese sind abhängig von der Nutzungsart und -intensität.<sup>171</sup>

Abbildung 3-12 zeigt eine beispielhafte Kurve für den Abbau des Abnutzungsvorrates. Der Verlauf des Abnutzungsvorrates wird in Abhängigkeit der Zeit zwischen dem Ausgangszustand der Herstellung bis zum Ausgangszustand nach der Instandsetzung dargestellt. Bei Unterschreitung der Abnutzungsgrenze kommt es zum Ausfall der Betrachtungseinheit. Die Abnutzungsgrenze

<sup>170</sup> Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S.134.

<sup>171</sup> Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012, S. 7-8.

stellt jenen Wert dar, ab dem die Einheit ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann und ein Eingreifen in Form einer Instandhaltungsmaßnahme notwendig wird. Dieser Wert muss aber nicht zwangsläufig mit dem Nullpunkt des Abnutzungsvorrates übereinstimmen. Die Grenze stellt vielmehr einen „vereinbarten und festgelegten Mindestwert des Abnutzungsvorrates“ dar.<sup>172</sup>

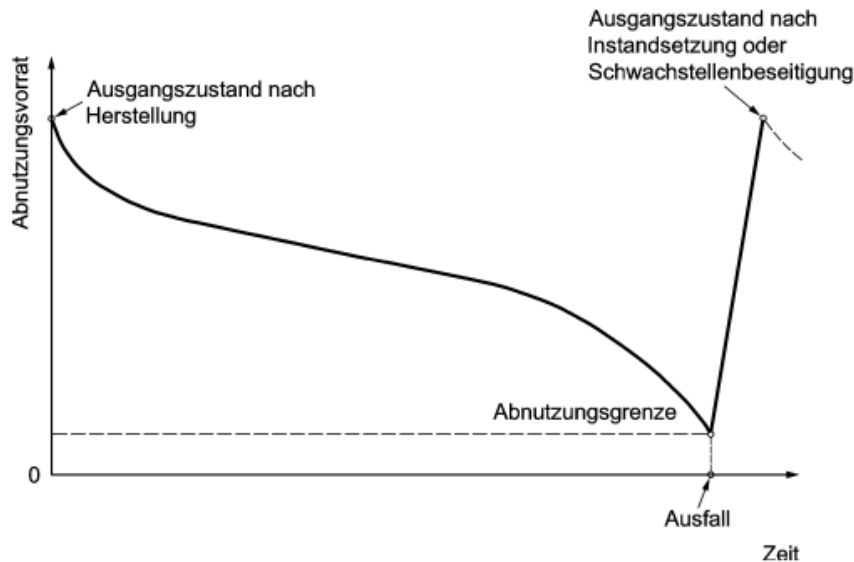


Abbildung 3-12: Zeitlicher Verlauf des Abbaus des Abnutzungsvorrates<sup>173</sup>

Bei einem fachgerechten Einbau eines Bauteils besitzt dieses eine bestimmte Gebrauchs- oder Funktionsfähigkeit. Im Verlauf der Gesamtnutzungsdauer reduziert sich der Abnutzungsvorrat aufgrund von materiellen Einflüssen. Eine Wiederherstellung oder Verbesserung des ursprünglichen Sollzustandes kann durch geeignete Instandhaltungsmaßnahmen erreicht werden.<sup>174</sup>

Die materiellen Einflüsse wirken sich im Gegensatz zu den immateriellen direkt auf den Abnutzungsvorrat des Bauteils aus und beeinflussen somit die technische Lebensdauer (vgl. Kapitel 3.3.2) des Bauteils, während die wirtschaftliche Lebensdauer (vgl. Kapitel 3.3.3) häufig von immateriellen Einflüssen begrenzt wird.<sup>175</sup> Diese immaterielle Alterung entsteht durch Wertverluste, die ihre Ursachen in den größer werdenden und sich ändernden Bedürfnissen und Anforderungen der Nutzer haben. Aus dieser Definition wird klar, dass für die Erhaltung der Infrastruktur der Fokus auf der Gewährleistung des Funktionsbetriebs liegt und daher die

<sup>172</sup> Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S.41.

<sup>173</sup> Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012. S. 8.

<sup>174</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.14.

<sup>175</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S.75.

Behebung der materiellen Abnutzung von Bedeutung ist.<sup>176</sup> In Abbildung 3-13 ist die Aufteilung der Abnutzungsursachen dargestellt.

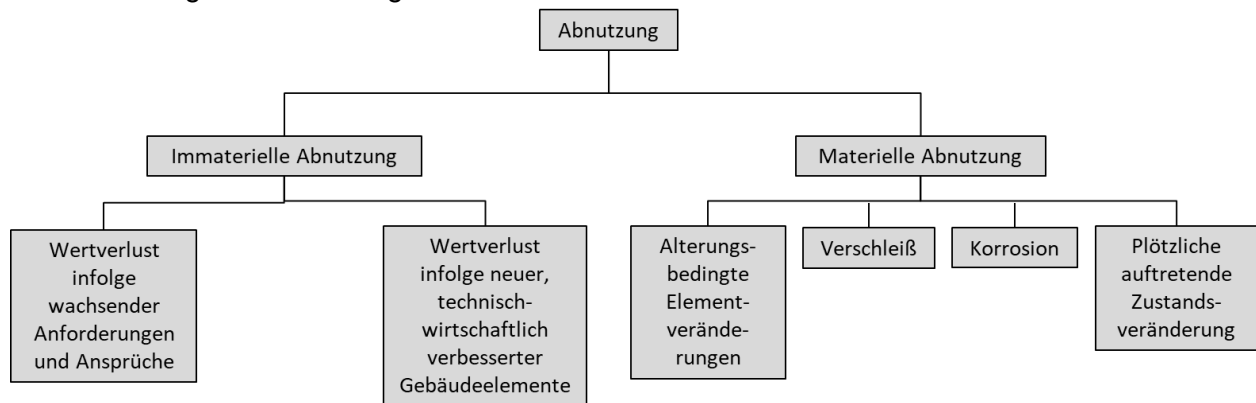


Abbildung 3-13: Gliederung der Abnutzungsursachen<sup>177</sup>

### 3.3.2 Technische Lebensdauer

#### 3.3.2.1 Definition

Die technische Lebensdauer ist der Zeitraum zwischen Errichtung und Ausfall des Objekts, d.h. sie ist erreicht, sobald das Bauwerk die vorgesehene Funktion nicht mehr erfüllen kann und Instandhaltungsmaßnahmen technisch nicht mehr möglich sind. Die technische Lebensdauer entspricht nach BAHR & LENNERTS der Obergrenze für die Haltbarkeit von Bauteilen.<sup>178</sup> Durch die Nutzung wird der Abnutzungsvorrat der einzelnen Bauteile unterschiedlich schnell verbraucht und die vorherbestimmte Funktionserfüllung ist ab einem bestimmten Zeitpunkt nicht mehr möglich. Die technische Lebensdauer wird durch die materielle Abnutzung bestimmt. Durch eine regelmäßige Instandsetzung kann die Abnutzung positiv beeinflusst werden und somit wäre eine unendlich lange technische Lebensdauer theoretisch möglich. Der Zeitraum der technischen Lebensdauer ist aber dadurch limitiert, dass es aus wirtschaftlicher Sicht zu einem bestimmten Zeitpunkt unzweckmäßig wird, Instandsetzungsmaßnahmen durchzuführen.<sup>179</sup>

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die technischen Lebensdauern von Bauteilen von Infrastrukturbauwerken betrachtet, also der Zeitraum zwischen der Inbetriebnahme eines Bauteils und dessen Austauschs.

<sup>176</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S.65.

<sup>177</sup> Krug, Klaus-Eberhard: Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung. Dissertation. Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig 1985, S.12.

<sup>178</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.16.

<sup>179</sup> Vgl. Wöhe, Günther; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 26., überarbeitete und aktualisierte Auflage. München 2016, S. 494 und S. 698.

### 3.3.2.2 Einflüsse auf die technische Lebensdauer

Materielle Einflüsse sind Faktoren, welche sich maßgeblich auf das Alterungsverhalten von Bauteilen auswirken. KRUG nennt in seiner Arbeit als Hauptgründe für die materielle Abnutzung alterungsbedingte Elementveränderungen, Verschleiß, Korrosion sowie plötzlich auftretende Zustandsveränderungen. BAHR & LENNERTS zählen zu den materiellen Alterungsgründen u.a. chemische Reaktionen und mechanische Einwirkungen.<sup>180</sup> Durch entsprechende Instandsetzungsmaßnahmen kann die materielle Abnutzung unbegrenzt oft aufgehoben werden.

Eine Gliederung der Einflussfaktoren, welche die materielle Abnutzung des Bauteils beeinflussen können, nimmt die DIN ISO 15686<sup>181</sup> vor. Sie unterscheidet die Kategorien Qualität, Umgebung und Nutzungsbedingungen und ordnet diesen die entsprechenden Faktoren zu. Tabelle 3-1 zeigt die Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686.

Kategorie	Faktor	Faktorklasse	Beispiele
Qualität	A	Bauteilqualität	Herstellung, Lagerung, Transport, Material
	B	Konstruktionsqualität	Eingliederung, konstruktiver Schutz
	C	Ausführungsqualität	Einbau, Personal, klimatische Bedingungen auf der Baustelle
Umgebung	D	Inneneinflüsse	Raumluft, Kondensation
	E	Außeneinflüsse	Standort, Klima, Luftverschmutzung
Nutzungsbedingungen	F	Nutzungsintensität	Mechanische Einflüsse, Nutzungsart, Verschleiß
	G	Instandhaltungsqualität	Qualität und Häufigkeit, Zugänglichkeit

Tabelle 3-1: Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686<sup>182</sup>

Im Folgenden werden die einzelnen Faktorklassen kurz erläutert und deren Relevanz für diese Arbeit untersucht.

#### Bauteilqualität

Die Eigenschaften von Bauteilen werden entsprechend den Herstellerangaben und Leistungsbeschreibungen festgelegt. Werden diese Anforderungen nicht erfüllt, kommt es zu einer erhöhten Schadensanfälligkeit des Bauteils und somit zu einer Verkürzung der Lebensdauer. Bei der Komponentenqualität spielen neben der Alterung der Baustoffe durch Materialermüdung, Korrosion oder Schwinden auch die Lagerung und der Transport der Bauteile eine Rolle.<sup>183 184</sup>

<sup>180</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.15.

<sup>181</sup> Vgl. ISO 15686-1: Buildings and constructed Assets- Service Life Planning- Part 1: General Principles and frameworks. ISO Copy Right Office. Geneva (CH).

<sup>182</sup> ISO 15686-1: Buildings and constructed Assets- Service Life Planning- Part 1: General Principles and frameworks. ISO Copy Right Office. Geneva (CH), S. 200.

<sup>183</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 75.

<sup>184</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.26.

### **Konstruktionsqualität**

Durch eine fehlerhafte Planung, welche nicht entsprechend den aktuell geltenden Normen, Richtlinien, Bestimmungen und Fachregeln durchgeführt wurde, kann es zu einer Reduktion der Lebensdauer kommen. Typische Beispiele für eine Reduktion der Lebensdauer durch Mängel in der Planung sind z.B. die Wahl ungeeigneter Baustoffe, unzureichende bzw. fehlerhafte Ausarbeitung von Details oder auch Fehler in der Ausschreibung.<sup>185 186</sup>

### **Ausführungsqualität**

Neben den auftretenden Mängeln in der Planung kommt es häufig auch zu Mängeln bei der Bauausführung. Als Grund dafür kann der erhöhte Zeit- und Kostendruck beim Bauen angeführt werden, die heutzutage keine Seltenheit sind. So werden immer wieder bei der Ausführung die anerkannten Regeln der Technik missachtet oder von Bauplänen abgewichen. Das führt im späteren Verlauf zu einem höheren Aufwand der Instandsetzung und zu einer Verringerung der Dauerhaftigkeit der Bauteile.<sup>187 188</sup>

### **Inneneinflüsse**

Die physikalischen, chemischen und biologischen Faktoren können zu einer Alterung der Bauteile im Innenraum führen. Als physikalische Faktoren sind die Luftfeuchtigkeit oder die Raumlufttemperatur zu nennen, die einen Einfluss auf das Behaglichkeitsempfinden des Menschen haben. Die innenräumlichen Umgebungsbedingungen spielen bei der Lebensdauerermittlung von Gebäuden eine Rolle und können bei der Lebensdauerermittlung von Infrastrukturbauanteilen vernachlässigt werden.<sup>189</sup>

### **Außeneinflüsse**

Zu den Umgebungsbedingungen im Außenraum zählen Umwelteinflüsse wie Temperaturveränderung, Hitze/ Frost, Wind sowie der Tausalzeinsatz. Die außenräumlichen Umgebungseinflüsse werden durch die Standortbedingungen beeinflusst, da sich die Klimabedingungen in den Regionen Deutschlands stark unterscheiden.<sup>190</sup> Da die DIN ISO 15686 auf Gebäude ausgelegt ist, zählt sie ebenfalls Belastungen durch Straßenverkehr zu den Umgebungseinflüssen. Da in dieser Arbeit jedoch Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur behandelt werden, wird dieser Faktor der Nutzungsintensität, also dem Faktor F, zugeordnet. Da diese Einflüsse für Infrastrukturbauwerke von besonderer Relevanz sind, werden diese im Folgenden näher betrachtet.

---

<sup>185</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 78.

<sup>186</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 28 ff.

<sup>187</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. Heft 22, S. 79.

<sup>188</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.27 ff.

<sup>189</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 81.

<sup>190</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 82-83.



Der Faktor „Wind“ wirkt auf die Außenflächen der Bauteile und ruft u.a. Druck- und Sogkräfte hervor, welche Schwingungen verursachen, die bestimmte Bauteile beanspruchen.<sup>191</sup> Betroffen von diesem Faktor sind vor allem tragende Bauteile wie Überbau und Pfeiler. Die dabei entstehenden Kräfte werden an Gründung, Lager und Widerlager weitergegeben. Dieser Faktor ist im Rahmen der Lebensdauerberechnung für diese Bauteile zu berücksichtigen. Im Tunnel sind Bauteile im Allgemeinen vom Wind geschützt und werden daher nicht durch ihn belastet. Die Intensität der Windeinwirkung ist von der Windgeschwindigkeit und den Turbulenzen abhängig. Je rauer ein Gelände ist, desto stärkere Turbulenzen treten auf. Dies bedeutet, dass auf ebenen Flächen geringere Turbulenzen auftreten als in dicht bebauten Gebieten.<sup>192</sup>

Temperaturunterschiede stellen ebenfalls einen Einflussfaktor der Kategorie „außenräumliche Bedingungen“ dar, welcher den Abnutzungsverlauf beeinflussen kann. Die Zwangsbelastungen, die infolge von Temperaturunterschieden entstehen, lassen sich aber bereits in der Planung bei statisch unbestimmten Systemen berücksichtigen. Für statisch bestimmte Systeme ist eine Berücksichtigung bei der Berechnung nicht notwendig, da diese Systeme genügend Bewegungsfreiheit bieten, diese Zwangsspannungen aufzunehmen. Weiterhin sind die Temperaturunterschiede meist gering, so dass dieser Einflussfaktor im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt wird.<sup>193</sup>

Neben Temperaturveränderungen gelten extreme Temperaturen ebenfalls als ein Einflussfaktor auf die Lebensdauer. Hohe Temperaturen können vor allem bei Asphaltstraßen den Abnutzungsverlauf beschleunigen. Wie aus der nachfolgenden Abbildung ersichtlich wird, nimmt die Dehnungsrate von Asphalt mit steigenden Temperaturen zu und es kommt zu irreversiblen Verformungen. Abbildung 3-14 macht deutlich, dass der Faktor „Hitze“ die Lebensdauer von Asphaltstraßen maßgeblich beeinflusst und daher zu berücksichtigen ist.

---

<sup>191</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.33.

<sup>192</sup> Vgl. Geißler, Karsten: Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung. Berlin 2014, S. 250-251.

<sup>193</sup> Vgl. Küchler, Michael: Instandsetzung von Betontragwerken. In: Betonkalender 2013. Berlin, München, Düsseldorf 2013, S. 381.

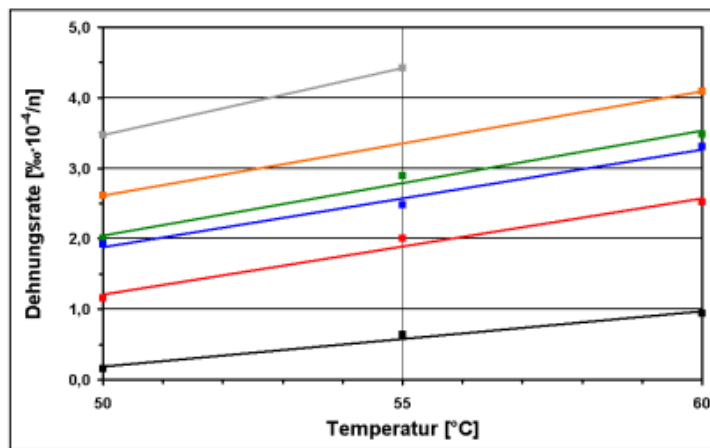
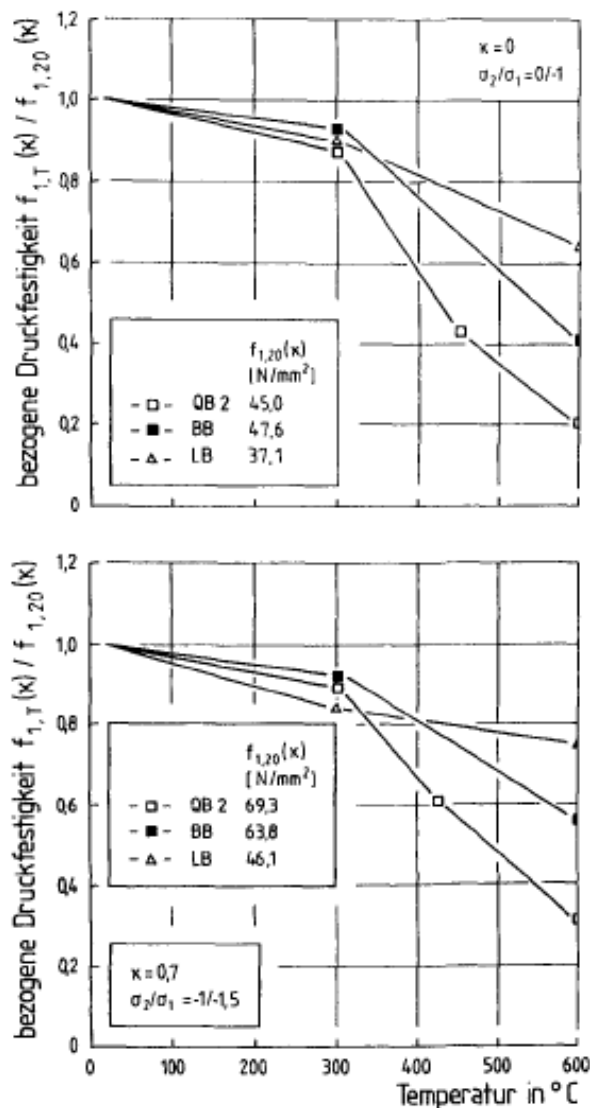


Abbildung 3-14: Dehnungsrate von Asphalt in Abhängigkeit der Temperatur<sup>194</sup>

Für Beton sind hohe Temperaturen infolge von Hitze unschädlich. Abbildung 3-15 zeigt das Verhalten der Druckfestigkeit von Normalbeton in Abhängigkeit der Temperatur. Zu erkennen ist, dass die Druckfestigkeit bis 300°C nur geringfügig abnimmt.<sup>195</sup> Dieser Faktor wird für Betonbauteile daher nicht weiter berücksichtigt.

<sup>194</sup> Karcher, Carsten: Ursachen und Entstehungsmechanismen von Straßenschäden. Kolloquium „Vermeidung von Straßenschäden in Kommunen“ am 23.11.2011. Karlsruher Institut für Technologie. S. 15.

<sup>195</sup> Vgl. Thienel, Karl-Christian: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung- Versuche und Modellbildung. Dissertation. TU Braunschweig. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. Braunschweig 1993, S. 86.


 Abbildung 3-15: Druckfestigkeit von Beton in Abhängigkeit der Temperatur und Zuschlagsart<sup>196</sup>

Das Vorhandensein von Niederschlag in Form von Regen oder Schnee kann Auswirkungen auf den Feuchtigkeitsgehalt von Beton haben. Dieser beeinflusst bspw. die Karbonatisierung. Das CO<sub>2</sub>-Gas kann nur durch Poren diffundieren, die nicht wassergefüllt sind, weshalb wassergesättigter Beton gegen Karbonatisierung geschützt ist. Beton, der vollständig trocken ist, ist ebenfalls vor Karbonatisierung geschützt, da für den Ablauf der Reaktion Wasser benötigt wird. Eine derartig niedrige relative Feuchtigkeit (ca. 30 %) existiert in Deutschland allerdings nicht. Ein optimaler Luftfeuchtigkeitsgehalt liegt bei ca. 50 - 70 %. Eine höhere Luftfeuchtigkeit hat eine Verlangsamung des Karbonatisierungsfortschrittes zur Folge. Daher sind regengeschützte Flächen stärker von der Karbonatisierung betroffen als Flächen, die dem Regen direkt ausgesetzt sind.<sup>197</sup> Der Faktor Feuchtigkeit muss dementsprechend berücksichtigt werden.

<sup>196</sup> Thienel, Karl-Christian: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung-Versuche und Modellbildung. Dissertation. TU Braunschweig. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. Braunschweig 1993, S. 87.

<sup>197</sup> Vgl. König, Gert; Maurer, Reinhard; Zichner, Tilman: Spannbeton- Bewehrung im Brückenbau. Berlin 1986, S. 135.

Neben hohen Temperaturen sind auch Temperaturen unter dem Gefrierpunkt schädlich für den Beton. Frostschäden treten auf, wenn ein bestimmter Grad der Wassersättigung vorliegt und kein ausreichender Ausweichraum, in den das nicht gefrorene Wasser entweichen kann, für die Raumvergrößerung des Wassers beim Gefrieren vorhanden ist.<sup>198</sup> Aufgrund der Volumenvergrößerung um ca. 9 % des Wassers infolge von Gefrieren kann es zu hydraulischen Druckspannungen im Betonfüge kommen, wodurch Rissbildungen und Abplatzungen entstehen können. Durch die Einhaltung bestimmter Betonrezepturen mit festgelegten w/z Werten kann Beton frostbeständig gemacht werden. Außenbauteile (Beton mit mäßiger Wassersättigung) sind bspw. bei einem w/z = 0,60 frostbeständig, Bauteile mit einer hohen Wassersättigung benötigen einen w/z = 0,50 zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit.<sup>199</sup> Schäden am Beton durch die Einwirkung von Frost entstehen an nicht-frostbeständigem Beton in der Regel erst nach mehreren Frost-Tau-Wechseln.<sup>200</sup>

Um das Gefrieren von Wasser bei entsprechend niedrigen Temperaturen zu verhindern, wird Streusalz eingesetzt. Durch den Einsatz derartiger Mittel kommt es zu besonders starken Beanspruchungen des Betons, die durch das rasche Tauen und den damit verbundenen schlagartigen Wärmeentzug in den oberen Zonen entstehen.<sup>201</sup> Aufgrund ihrer exponierten Lage sind Kappen und Fahrbahnen am stärksten von Frost-Tausalz-Wechseln beansprucht.<sup>202 203</sup> Durch Spritzwasser sind auch Lager, Widerlager und Pfeiler vom Tausalzeinsatz betroffen. Im Tunnel sind seitliche technische Anlagen dem Tausalzeinsatz ausgesetzt.<sup>204 205</sup> Bei unzureichender Betondeckung kann es infolge von Beschädigungen durch Korrosion zu freiliegender Bewehrung und Abplatzungen kommen.

### **Nutzungsintensität**

Die Nutzungsintensität ist bei vielen Bauteilen der Einflussfaktor mit der größten Auswirkung. Bauteile werden sozusagen verschlissen, wobei die Hauptursache des Verschleißes häufig auf eine unvorhergesehene erhöhte Beanspruchung der Bauteile, bspw. durch starken Verkehr, zurückzuführen ist.<sup>206</sup> Die Verkehrswege, Brücken und Tunnel werden durch Fahrzeuge genutzt, die sich in ihrem Gewicht, ihrem Abstand zueinander und der Geschwindigkeit unterscheiden. Ein wichtiger Aspekt dabei ist das Verhalten der Nutzer, d.h. bspw. inwieweit sich diese an die vorgegebene Nutzung halten. Im Bereich der Infrastruktur bedeutet dies, die Respektierung der vorgegebenen Geschwindigkeitsgrenzen bzw., falls begrenzt, des maximalen Fahrzeuggewichts.

---

<sup>198</sup> Vgl. Bonzel, Justus: Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand. Düsseldorf. S. 185-186.

<sup>199</sup> Vgl. Weber, Silvia: Betoninstandsetzung: Baustoff – Schadensfeststellung – Instandsetzung. Wiesbaden 2013, S. 34 - 36.

<sup>200</sup> Vgl. Bonzel, Justus: Beton mit hohem Frost- und Tausalzwiderstand. Düsseldorf. S. 186.

<sup>201</sup> Vgl. Bonzel, Justus; Siebel, Eberhard: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. 1977. S. 56.

<sup>202</sup> Vgl. Mehlhorn, Gerhard (Hrsg.); Curbach, Manfred (Hrsg.); Freundt, Ursula; Hölzer, Dirk: Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. 3. Auflage. Wiesbaden 2014, S. 1143.

<sup>203</sup> Vgl. König, Gert; Maurer, Reinhard; Zichner, Tilman: Spannbeton- Bewährung im Brückenbau. Berlin 1986, S. 205.

<sup>204</sup> Vgl. Mehlhorn, Gerhard (Hrsg.); Curbach, Manfred (Hrsg.); Eichinger-Vill, Eva-Maria; Kollegger, Johann: Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten. 3. Auflage. Wiesbaden 2014, S. 1178.

<sup>205</sup> Vgl. Geißler, Karsten: Handbuch Brückenbau: Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung. Berlin 2014, S. 1122.

<sup>206</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.35 ff.

Ein weiterer maßgebender Faktor ist die vorgesehene Art der Nutzung. In der DIN ISO 15686 bezieht sich dies auf die Art des Gebäudes, bspw. ob es sich um ein Krankenhaus, Wohnhaus oder Bürogebäude handelt. Übertragen auf die Verkehrsinfrastruktur wird zwischen den verschiedenen Straßenklassen wie Autobahnen, Landstraßen oder Ortsdurchfahrten unterschieden.

Aus der Nutzungsintensität ergibt sich die mechanische Belastung. Wichtige Parameter sind diesbezüglich die Verkehrslasten und die Verkehrsintensität. Mechanische Belastungen können auch durch eine zusätzliche Beanspruchung (z.B. Wind) herbeigeführt werden. Weitere Faktoren in diesem Bereich können Unfälle, Brände oder das Anprallen von Fahrzeugen an Bauteile sein. Da solche Geschehnisse die Lebensdauer eines Bauteils zwar stark reduzieren können, jedoch nicht vorhersehbar sind, werden sie im Rahmen der Arbeit nicht weiter behandelt.

Ein weiterer Aspekt der Nutzungsintensität ist die Betriebszeit. Dies ist vor allem für die technischen Anlagen im Tunnel entscheidend. Bei der Beleuchtung ist einerseits die Leuchtdauer für die Lebensdauer entscheidend, andererseits verkürzt ein häufiger Wechsel von der An- in die Ausphasen die Lebensdauer. Deshalb ist die Lebensdauer von den Leuchten am Tunneleingang häufig kürzer, da hier die Beleuchtung an die Tageslichtbedingungen angepasst wird, während im Tunnelinneren meist eine durchgehende Beleuchtung gegeben ist.

Unter der Nutzungsintensität können folglich die Verkehrslast, die zulässigen Geschwindigkeiten und die verschiedenen Betriebsphasen verstanden werden.

### **Instandhaltungsqualität**

Die Qualität der Instandhaltung kann die Lebensdauer eines Bauteils positiv beeinflussen. Die Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen hat den Hintergrund, die Abnutzungspotenziale der Bauteile wiederherzustellen oder zu erhöhen. Bei regelmäßigen und sorgfältigen Instandhaltungen und Wartungen kann die Lebensdauer somit verlängert werden. Im Gegensatz vermindert sich die Dauerhaftigkeit der Bauteile, falls die Inspektions- und Wartungsintervalle nicht eingehalten oder bei nicht sachgemäßer ausgeführt werden.<sup>207</sup>

In Kapitel 3.1.2 wurden verschiedene Strategien vorgestellt, nach denen die Instandhaltung durchgeführt werden kann. Dabei sind die Regelmäßigkeit und Häufigkeit dieser Maßnahmen eine bedeutende Einflussgröße für die Lebensdauer. (Entscheidend für die Lebensdauer eines Bauteils ist auch die Qualität der Instandhaltung.) Bei einer qualitativ hochwertigen Instandhaltung sollten die Vorgaben, Richtlinien und Herstellerempfehlung eingehalten und die Intervalle richtig gewählt werden.<sup>208</sup>

---

<sup>207</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.36 ff.

<sup>208</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 90.

### 3.3.2.3 Verfahren zur Ermittlung von Lebensdauern zur Beschreibung der Alterung

Verfahren zur Lebensdauerermittlung lassen sich in stochastische/wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden und anwendungsorientierte Näherungsmethoden aufteilen.<sup>209</sup>

Stochastische/wahrscheinlichkeitstheoretische Methoden haben einen sehr materialspezifischen und hoch spezialisierten Charakter. Der Alterungsprozess soll mit diesen Methoden so exakt wie möglich dargestellt werden. Aus diesem Grund werden die verschiedenen Beanspruchungen und die damit verbundenen Schadensbilder präzise und detailliert analysiert. Mit Hilfe dieser Methoden kann die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Elements zu jedem Zeitpunkt abgelesen werden.<sup>210</sup> Bei den anwendungsorientierten Näherungsmethoden wird mittels Annahmen die Lebensdauer so plausibel wie möglich abgeschätzt. Relevante Einflussgrößen werden dabei nicht berücksichtigt, wodurch diese Methoden nur als grobe Näherung zu betrachten sind.<sup>211</sup>

Die sogenannte **Kennwertmethode** verwendet Quellen mit Lebensdauerangaben von Bauteilen oder Bauelementen. Diese Angaben weichen zum Teil deutlich voneinander ab und werden ohne weitere Angaben zu den Randbedingungen der Datengrundlage angegeben. Diese Kennwerte aus der Literatur dienen als erster Anhaltspunkt. In der Praxis entspricht die tatsächliche Lebensdauer eines Bauteils meist nicht den Angaben aus den Kennwerten, da unterschiedliche Eigenschaften und verschiedene Einflussfaktoren auf das Bauteil einwirken.<sup>212</sup>

Die **Referenzfaktorenmethode** basiert auf einem Bauelementkatalog, in dem die instandhaltungsrelevanten Bauteile nach der DIN 276 gegliedert sind. Die im Katalog angeführten Angaben der mittleren Lebenserwartung basieren auf der Annahme von normalen durchschnittlichen Verhältnissen hinsichtlich der Nutzung, Qualität, Umwelt und Instandhaltungsintensität aus. Durch die Berücksichtigung dieser Faktoren wird die mittlere Lebensdauer je nach Umgebungsbedingung nach oben oder unten korrigiert. Die Einflüsse haben aber keine Gewichtung oder Rechenvorschrift und werden durch den Anwender anhand seiner individuellen Erfahrung festgelegt. Die gesamte Lebensdauerermittlung unterliegt demnach subjektiven und persönlichen Erfahrungen.<sup>213</sup>

Die **Faktorenmethode der DIN ISO 15686** versucht verschiedene Umgebungsbedingungen der Bauteile zu berücksichtigen, in dem die Referenzlebensdauer durch modifizierte Faktoren erhöht oder reduziert wird. Die Wahl der modifizierten Faktoren soll auf Basis von Erfahrungswerten

---

<sup>209</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.18.

<sup>210</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S.18.

<sup>211</sup> Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 49.

<sup>212</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 19ff.

<sup>213</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 21.

erfolgen.<sup>214</sup> Dadurch kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass subjektive Einflüsse oder Ähnliches die spezifische Lebensdauer verfälschen.

Um die Schwächen des Modells nach der DIN ISO 15686 zu beheben, wurden einige modifizierte Modelle entwickelt. Hierzu zählen u.a. ein Forschungsvorhaben der TU Graz, bearbeitet von SCHULTER UND MAYDL<sup>215</sup>, das Forschungsprogramm Zukunft Bau im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung bearbeitet von BAHR UND LENNERTS<sup>216</sup> und das Modell von RITTER<sup>217</sup>.

Im Rahmen der Entwicklung des Bauwerksmanagementsystems durch die BAST (vgl. Kapitel 3.4.7) wurden für die Beschreibung von Nutzungsdauern von Verschleißbauteilen wie beispielweise Lager, Fahrbahnübergangskonstruktionen etc. Expertenbefragungen durchgeführt, um so mittlere Nutzungsdauern anzugeben. Aus diesen gewonnenen Lebensdauern und Angaben aus der Literatur werden minimale, maximale und mittlere Lebensdauern ermittelt. Auch hier können die Daten durch subjektive Einflüsse verfälscht sein.

#### **3.3.2.4 PIARC - Life Cycle Aspects of electrical Road Tunnel Equipment**

Die Studie der World Road Assoziation PIARC untersucht, welchen Einfluss die Lebensdauer der technischen Ausstattung auf die Lebenszykluskosten von Tunnel hat. Die Studie soll zeigen, wie die Berücksichtigung verschiedener Aspekte der Lebenszyklusrechnung sowohl die Planung als auch die Instandhaltungskonzepte im Hinblick auf eine Reduzierung der Kosten unterstützen kann.<sup>218</sup>

Um die durchschnittlichen Lebensdauern verschiedener technischer Bauteile im Tunnel zu bestimmen, wurde eine Umfrage unter 27 Befragten aus 10 verschiedenen Ländern durchgeführt. Die Ergebnisse der Datenerhebung ergaben, dass die Nutzungsdauern der technischen Ausstattung von Straßentunneln zwischen 10 und 25 Jahren liegen. Die durchschnittliche Lebensdauer über alle Bauteile beträgt ca. 15 Jahre. Die Umfrage basierte auf folgenden Kriterien:<sup>219</sup>

- Erhebung der Daten zu 26 verschiedenen Bauteilen in Straßentunneln
- Mögliche Antworten: 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 Jahr

Die Genauigkeit der Prognose kann durch eine realitätsnahe Abschätzung der Lebensdauern verbessert werden, um so eine gezielte Optimierung der Kosten zu erhalten. Die Studie zeigt, dass es sinnvoll ist, Einflussfaktoren zu berücksichtigen, welche sich auf die Nutzungsdauer der

---

<sup>214</sup> Vgl. ISO 15686-1: Buildings and constructed Assets- Service Life Planning- Part 1: General Principles and frameworks. ISO Copy Right Office. Geneva (CH).

<sup>215</sup> Schulter, Daniel; Maydl, Peter: AP 02- Nachhaltigkeit massiv. Lebensdauer von Bauteilen und Bauprodukten. Graz 2009, S. 12.

<sup>216</sup> Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 65.

<sup>217</sup> Vgl. Ritter, Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S.105.

<sup>218</sup> Vgl. PIARC Technical Committee C.4: Life Cycle Aspects of electrical road tunnel equipment. 2010. S. 22-23.

<sup>219</sup> Vgl. PIARC Technical Committee C.4: Life Cycle Aspects of electrical road tunnel equipment. 2010. S. 22-23.

verschiedenen Bauteile auswirken wie bspw. Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Es wird darauf hingewiesen, dass insbesondere die Temperatur einen großen Einfluss auf die Lebensdauer der technischen Anlagen hat. Eine Dokumentation der Ausfallzeiten verschiedener Bauteile sollte die Gründe für den Ausfall beinhalten, damit die Ergebnisse nicht auf Projekte mit unterschiedlichen Randbedingungen übertragen werden.

### 3.3.2.5 Referenzwerte für Lebensdauern aus der Literatur

In der Literatur gibt es verschiedene Quellen, welche die Lebensdauern von verschiedenen Bauteilen oder ganzen Funktionseinheiten angeben.<sup>220</sup> Die Gliederung des Bauwerks wird dabei vor allem bei den technischen Anlagen von Tunnelbauwerken nicht einheitlich vorgenommen. Nicht jede Quelle enthält Lebensdauern für alle Bauteile. Einige Quellen machen nur Angaben zu Lebensdauern von ganzen Funktionseinheiten, während andere Quellen diese Funktionseinheiten weiter detaillieren. In Tabelle 3-2 sind Lebensdauern für die technische Ausstattung von Tunnelbauwerken aus verschiedenen Quellen gegenübergestellt. Da die Richtlinie „*Straßentunnel- Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen*“ der österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene - Verkehr die detaillierteste Gliederung des Bauwerks enthält, wurde diese für folgende Darstellung übernommen und mit den Lebensdauern aus weiteren Quellen ergänzt.

---

<sup>220</sup> Vgl. auch: Zimmermann, Josef; Reiser, Maximilian: Prognose des Verbrauchs grauer Energie über die Lebensdauer von Gebäuden. In: Bautechnik 98, Heft 1. Berlin 2020. S. 63-73.



Funktionseinheit	Bauteile	BuS <sub>221</sub>	Vogt <sup>222</sup>	PIARC <sub>223</sub>	Welte <sub>224</sub>	Design of Road Tunnels <sup>225</sup>
Belüftung	Mechanische Anlagenteile Axialventilator	30	x	18,2	15-30	30
	Mechanische Anlagenteile Strahlventilator	20	35			18
	Elektromechanische Anlagenteile Axialventilator	20	x			30
	Elektromechanische Anlagenteile Strahlventilator	20	35			18
	Regelung/ Steuerung	15	x			20
	Gebäudelüftung, Klimaanlage	15	x			< 5
Beleuchtung	Einfahrtsbeleuchtung	20	20	11,2	<5	18
	Innenstreckenbeleuchtung	20	20			18
	Beleuchtung Querschläge/ Fluchtwege	20	20			x
	Fluchtweghinweisleuchte	10	20			10
	Regelung/ Messwerverfassung	15	20			20
Mess-einrichtungen	CO- Gaswarngerät	15	12	x	5-10	13
	Sichttrübenmesseinrichtung	15			5-10	13
	Längsgeschwindigkeits-messung	15			5-10	x
Verkehrsanlagen	Straßenverkehrszeichen	10	20	14,1	10-15	14
	Verkehrszählung	10	x	x		13
	Videoanlagen	10	x	14,8		15
	Verkehrslightsignalanlagen	10	x	x		14
	Höhenkontrolle	10	x	x		15
	Verkehrsleit- und Infoeinrichtungen	15	20	x		15
Notruf	Notruf	15	20	14,8	x	15
Telefonanlage (Festnetz)	Telefonanlage (Festnetz)	20	x	x	x	15
Funkanlage	Funkanlage	15	20	14,8	<5	15
Lautsprecher-anlage	Lautsprecher	20	15	14,8	x	x
BMA	Linienbrandmelder als Sensorkabel	20	15	14,8	5-10	5
	BMA-Steuerung	10	x		x	20
	Löschleinrichtungen	20	20-50		x	20
	Löschwasserversorgung	20			x	30
	Lösch- und Bindemittelvorrat	20	x		x	20
Steuerung	Automatisierung	15	8	10,7	x	x
	Prozessvisualisierung	10			x	10
	Archivierung/ Datenauswertung	10			x	x
Türen, Tore, Verkleidungen	Türen, Tore, Verkleidungen	20	x	x	x	x

Funktionseinheit	Bauteile	BuS	Vogt	PIARC	Welte	Design of Road Tunnels
Energieversorgung	Mittelspannungsanlage	25	20	20,1	15-30	20
	Niederspannungsanlage	25				20
	SSV-Anlage	15			10-15	20
	Notstromaggregate	25			3-15	x
	Blitzschutzanlagen	25			x	x
	Erdungs- und Potentialausgleich	25			x	x
Verkabelung	Verkabelung	x	x	25,7	10-15	50

**Tabelle 3-2: Lebensdauern Tunnelbauwerke KGR 400 aus der Literatur**

Die Gliederung einer Brücke in ihre einzelnen Bestandteile ist in der Literatur einheitlicher vorhanden als bei Tunnel. Auch hier gibt es Angaben aus verschiedenen Quellen, welche in Tabelle 3-3 zusammengefasst sind. Zu beachten ist, dass die einzelnen Quellen aufeinander aufbauen. Beispielsweise sind die ABB-Ö sowie die ABBV aufeinander abgestimmt, was an den Werten in Tabelle 3-3 erkennbar ist. Teilweise werden Lebensdauern für Belag und Abdichtung zusammen angeben.

<sup>221</sup> Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Straßentunnel -Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen. RVS 13.03.41. Wien 2014, S. 10-11.

<sup>222</sup> Vogt, Peter: Modell zu Lebenszykluskosten von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften. Bochum 2012.S. 165.

<sup>223</sup> PIARC Technical Committee C.4: Life Cycle Aspects of electrical road tunnel equipment. 2010. S. 22-23.

<sup>224</sup> Urs Welte: KNOWING THE USEFUL LIFE PERIOD OF TECHNICAL EQUIPMENT – A PREREQUISITE FOR SAFE TUNNEL OPERATIONS. International Conference „Tunnel Safety and Ventilation“ 2004, Graz. S. 201-208.

<sup>225</sup> Design Manual for Roads and Bridges (DMRB), Volume 2, Section 2, Part 9, BD 78/99: Design of Road Tunnels. London: Department for Transport, August 1999. S. 186.

Funktionseinheit (ABBÖ)	Bauteil	ABBV <sup>231</sup>	ABBÖ <sup>230</sup>	Ralph Holst <sup>229</sup>	Schmuck/Löffler <sup>228</sup>	Lebensdauermode II des Bund-Länder Fachausschusses <sup>227</sup>	König/Maurer/Zichner <sup>226</sup>
Schutzeinrichtungen		30	20-30	30	25	27	30
	Kappen	25	20-30	25	30	20	30
Entwässerung	Schacht	50	20-30	30	25	22	20
	Rohrleitung	60-100		30	20	15	20
Abdichtung							
Fahrbahn	Asphalt	15-25		15	20	15	20
	Beton	30					
Lager	Kalottenlager	30	20-30	30	30	9	30
	Elastomerlager						
Fahrbahnübergänge		20	20-30	20	20	17	20
Unterbau	Stahlbeton	110	110	110	110	94	120
Überbau	Stahlbeton	70	70	70	70	67	60

Tabelle 3-3: Lebensdauern Brückenbauwerke aus der Literatur

<sup>226</sup> König, Gert; Maurer, Reinhard; Zichner, Tilman: Spannbeton- Bewährung im Brückenbau. Berlin 1986.

<sup>227</sup> Landschaftsverband Rheinland, Straßenbauverwaltung, Referat Brücken- und Tunnelbau: Finanzbedarf für die Unterhaltung und Erneuerung der Bauwerke. Köln, Okt. 1984.

<sup>228</sup> Schmuck, A.; Löffler, M.: Untersuchung des Planungsfalls "Straßenerhaltung" für das überörtliche Straßennetz in Hessen. Schlussbericht zum Untersuchungsauftrag des Hessischen Landesamts für Straßenbau, 1985.

<sup>229</sup> Holst, Ralph: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3. Heft B 50. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW.2006.

<sup>230</sup> ABBÖ: Vereinbarung zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen. Nummer 100/1/BA-A. HL-AG, asfinag und ÖBB.

<sup>231</sup> ABBV: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. „Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz. ABBV.

Zu erkennen sind teilweise deutliche Unterschiede bei der Angabe der Lebensdauern in den verschiedenen literarischen Quellen. Es kann nicht nachvollzogen werden, auf welcher Basis die Lebensdauern ermittelt wurden und welche Daten für die Auswertung zur Verfügung standen. Unklar ist ebenfalls, ob verschiedene Einflussfaktoren berücksichtigt wurden und die Datenbasis eine homogene Stichprobe darstellte. Aufgrund der teilweise erheblichen Unterschiede lässt sich jedoch vermuten, dass die Daten nicht vergleichbar sind.

### **3.3.3 Wirtschaftliche Nutzungsdauer**

#### **3.3.3.1 Definition**

Im Gegensatz zur technischen Lebensdauer wird die wirtschaftliche Nutzungsdauer durch die immaterielle Abnutzung bestimmt. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer bezeichnet den Zeitraum, in dem es ökonomisch sinnvoll ist, den Betrieb des Objekts durch Instandsetzungsmaßnahmen aufrechtzuerhalten. Sie endet, sobald die Kosten für die Aufrechterhaltung des Betriebs die Erträge übersteigen.<sup>232</sup> Dabei übersteigt die technische Lebensdauer in der Regel die wirtschaftliche Nutzungsdauer.<sup>233</sup>

Die wirtschaftliche Nutzungsdauer wird auch von den sich ändernden Nutzeranforderungen bestimmt. Wenn ein Bauteil nicht mehr den aktuellen Anforderungen und Bedürfnissen des Nutzers entspricht, kann das Ende der wirtschaftlichen Nutzungsdauer erreicht sein, auch wenn das Bauteil seine Funktion noch erfüllen kann und somit die technische Lebensdauer noch nicht erreicht ist. Hat ein Objekt seine wirtschaftliche Nutzungsdauer erreicht, kann dies nicht mehr durch Instandsetzungsmaßnahmen, sondern nur noch durch entsprechende Modernisierungsmaßnahmen ausgeglichen werden.<sup>234</sup>

#### **3.3.3.2 Einflüsse auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer**

Häufig erfolgt der Austausch eines Bauteils unabhängig von seinem Abnutzungsvorrat. Diese sogenannte immaterielle Alterung entsteht durch Wertverluste, die ihre Ursachen in den wachsenden und sich ändernden Ansprüchen und Anforderungen der Nutzer haben. Sie kann auch durch technische und wirtschaftliche verbesserte Elemente entstehen oder aus einem geänderten Markt- und Konsumverhalten resultieren bzw. Folge von gesetzlichen Änderungen sein.<sup>235</sup> <sup>236</sup> Die Thematik der Obsoleszenz wird in der Literatur oft nur sehr oberflächlich behandelt. Ritter gibt an, dass die immaterielle Alterung nicht im Bauteil begründet ist und nicht

---

<sup>232</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 16, 17.

<sup>233</sup> Vgl. Vogt, Peter: Modell zur Lebenszykluskosten von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften. Bochum 2012. S. 51.

<sup>234</sup> Vgl. Krug, Klaus-Eberhard: Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung. Dissertation. Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig 1985, S. 12.

<sup>235</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 15.

<sup>236</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 44.

beeinflusst werden kann. Daher ist die Vorhersage der wirtschaftlichen Lebensdauer, also der „tatsächlichen Verweildauer von Bauteilen in bzw. an einem Gebäude“ nicht möglich.<sup>237 238</sup> BAHN und LENNERTS führen in ihrem Forschungsvorhaben als immaterielle Einflussfaktoren die funktionale, die technische, die modische, die baurechtliche, die ökologische sowie die ökonomische Obsoleszenz an. Sie betrachten aber auch nur die materiellen Einflussfaktoren, „da eine Vorhersage normativer, wirtschaftlicher oder auch gesellschaftspolitischer Einflüsse nicht möglich ist“.<sup>239</sup> Da diese immateriellen Einflussfaktoren keine Auswirkungen auf die technische Lebensdauer eines Bauteils haben, werden sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Für eine detaillierte und umfangreiche Ausführung sei hier auf die Arbeit von ALTMANN<sup>240</sup> verwiesen.

### 3.3.4 Gesamtnutzungsdauer

Die Gesamtnutzungsdauer ist nach ImmoWertV in §23 definiert als „die bei ordnungsgemäßer Bewirtschaftung übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer der baulichen Anlagen“<sup>241</sup>. Durch sie wird die Anzahl an Jahren definiert, in der eine Immobilie in der Regel genutzt werden kann. Die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer wird durch den Objektbetrieb gebildet. Sie bildet die Gesamtnutzungsdauer ab. Die technische Gesamtnutzungsdauer stellt eine Obergrenze der wirtschaftlichen Nutzungsdauer dar.<sup>242</sup>

---

<sup>237</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 93.

<sup>238</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 41.

<sup>239</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 59.

<sup>240</sup> Vgl. Altmann, Isabella: Einfluss von Veralterungsprozessen auf den Wert von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2017.

<sup>241</sup> Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, ImmoWertV, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, § 23.

<sup>242</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 63.

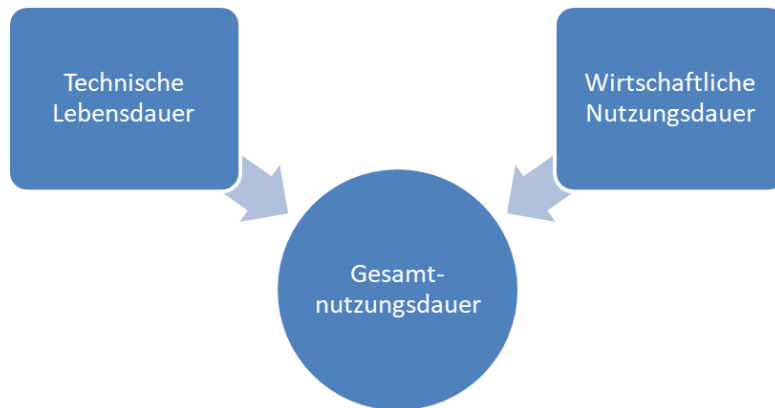


Abbildung 3-16: Ableitung der Gesamtnutzungsdauer<sup>243</sup>

### 3.3.5 Abhängigkeiten von Bauteilen

Für die Funktionsfähigkeit von Bauwerken sind Kombinationen unterschiedlicher Materialschichten und Bauteile notwendig, woraus sich physische Abhängigkeiten unter den Bauteilen ergeben. Die Kombinationen bestehen in der Regel aus Bauelementen mit unterschiedlichen Lebensdauern.

Unter physischer Unabhängigkeit wird verstanden, dass die einzelnen Bauteile gegenständig getrennt bzw. gefügt werden können, ohne die Funktionsfähigkeit eines anderen Bauteils zu beeinflussen. Neben der physischen Abhängigkeit können Bauteile auch funktional miteinander „verbunden“ sein. Eine funktionale Abhängigkeit liegt vor, wenn das Bauteil die ihm zugedachte Funktion selbstständig erfüllen kann.<sup>244</sup>

Physische Abhängigkeiten zwischen zwei Bauteilen können durch verschiedene konstruktive Verbindungen hergestellt werden. Schwierigkeiten bei einer Instandsetzungsmaßnahme entstehen vor allem bei Bauteilen mit unlösbaren Verbindungen. Durch derartige Verbindungen müssen intakte Bauteile zusammen mit den defekten Bauteilen ausgebaut werden. Durch verschiedene Verbindungsarten können sowohl einzelne Materialien als auch ganze Bauteile miteinander verbunden werden. Die Art der Verbindung zwischen zwei Bauteilen ist dabei zu berücksichtigen. Grundsätzlich können zwei Arten von Verbindungen unterschieden werden:

1. Flächenverbindungen: Verbindungen von angrenzenden Material- bzw. Bauteilschichten
2. Einzelverbindungen: Verbindungen von einzelnen Bauteilen untereinander<sup>245</sup>

Es sind verschiedene Verbindungstypen zwischen den unterschiedlichen Materialschichten, aber auch zwischen den einzelnen Bauteilen zu identifizieren. Vor allem die Lösbarkeit bzw. Trennbarkeit einzelner Schichten ist ausschlaggebend für das Ausmaß einer Instandsetzungsmaßnahme. Folgende Verbindungstypen können unterschieden werden:

<sup>243</sup> Zimmermann, Josef: Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung. Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2019. S. 1-30.

<sup>244</sup> Vgl. Göpfert, Jan: Modulare Produktentwicklung – Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation. Dissertation. Technische Universität München. Wiesbaden 1998. S.104- 107.

<sup>245</sup> Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S. 71.

- Typ 1: lösbare Verbindung
- Typ 2: bedingt lösbare Verbindung
- Typ 3: verschmutzt lösbare Verbindung
- Typ 4: unlösbare Verbindung

Bauteile gelten als lösbar, wenn sie ausgetauscht werden können, ohne dabei angrenzende intakte Bauteile zu beschädigen. Bauteile, welche bedingt lösbar sind, zerstören durch den Ausbauprozess lediglich das Verbindungsmittel. Angrenzende Bauteile bleiben aber unbeschädigt. Unlösbare Verbindungen kennzeichnen sich dadurch, dass angrenzende funktionsfähige Bauteile mit ausgetauscht werden müssen.<sup>246</sup> Für die Instandsetzungsplanung reicht es aber, nur zwischen lösbaren und nicht lösbaren Verbindungen zu unterscheiden.

Ebenfalls eine wichtige Rolle für die Planung von Instandsetzungsmaßnahmen spielt die Zugänglichkeit von Bauteilen. Sichtbare Bauteile können einfacher ausgetauscht werden als verdeckte. In der Regel bringt eine Maßnahme an einem verdeckten Bauteil immer eine Beeinflussung anderer Bauteile mit sich.

### 3.3.6 Modelle zu Abnutzungswahrscheinlichkeiten

SCHRÖDER<sup>247</sup> entwickelte eine Alterswertfunktion, die den altersbedingten Wertverlust von Bauteilen beschreibt. Die Alterswertfunktion wurde durch Näherung empirisch gewonnener Daten zwischen Alter und Wert ermittelt. Die Entwertungskurve wurde so festgelegt, dass am Anfang der Lebensdauer die Alterung in kleinen Schritten und später bei schlechteren Zuständen schneller verläuft. Aus dem Zustand des Bauteils können dann Unterhaltsbedarf, Sanierungsbedarf und -kosten sowie der optimale Sanierungszeitpunkt abgeleitet werden. Die Alterswertfunktion wurde aus empirischen Daten ermittelt. Allerdings lassen sich die verwendeten Daten nicht überprüfen und somit kann nicht festgestellt werden, wie belastbar die Näherung der Alterswertfunktion von Schröder ist. Die verschiedenen Einflussfaktoren auf das Alterungsverhalten von Bauteilen (z.B. Standort, Bauteilqualität etc.) können mit der Alterswertfunktion nicht berücksichtigt werden.<sup>248</sup>

CHRISTEN/ MEYER-MEIERLING berücksichtigen im Rahmen Ihrer Untersuchungen den Einfluss der Instandhaltungsqualität auf die Alterung und die Instandhaltungskosten eines Bauteils. Eine 100 %ige Instandhaltungsqualität bedeutet, dass alle Instandhaltungsmaßnahmen gemäß Unterhaltsplan durchgeführt werden und so das Bauteil die normale technische Lebensdauer erreichen wird. Liegt die Instandhaltungsqualität nicht bei 100 %, wird die Restlebensdauer des Bauteils um einen Faktor  $r_{IH}$  reduziert.<sup>249</sup>

Im Rahmen des Forschungsprojektes **Impulsprogramm Bau** wurden für verschiedene Bauteile aus einem Gebäudebestand von insgesamt 200 Wohnbauten unterschiedlichen Alters die

---

<sup>246</sup> Vgl. Herzog, Kati: Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden. Technische Universität Darmstadt. Darmstadt 2005, S. 96-97.

<sup>247</sup> Vgl. Schröder, Jules: Zustandsbewertung großer Gebäudebestände. In: Schweizer Ingenieur und Architekt. Band 107. Heft 17. 1989. S. 449-459.

<sup>248</sup> Vgl. Schröder, Jules: Zustandsbewertung großer Gebäudebestände. In: Schweizer Ingenieur und Architekt. Band 107. Heft 17. 1989. S. 449-459.

<sup>249</sup> Vgl. Christen, Kurt; Meyer-Meierling, Paul: Optimierte Zyklen und Finanzierung der Instandsetzung. In: Schweizer Ingenieur und Architekt. Band 117. Heft 8. 1999. S. 163-166.

Ersatzzeitpunkte ermittelt, woraus insgesamt drei Entwertungskurven entwickelt wurden. Für jedes Bauteil ist eine minimale, mittlere und maximale Entwertungskurve vorhanden. Bauteile, welche optimale Voraussetzungen haben, können der maximalen Kurve, Bauteile mit schlechten Voraussetzungen der minimalen Kurve und Bauteile mit mittleren Voraussetzungen der mittleren Kurve zugeordnet werden. Dieses Verfahren ist prinzipiell geeignet, jedoch von einer großen Datenmenge abhängig, um verlässliche und belastbare Ergebnisse zu erhalten. Ein monetärer Vergleich von verschiedenen Instandhaltungsstrategien ist aber mit diesem Modell nicht möglich.<sup>250</sup>

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Systematische Auswertung von Schäden an Brücken“ wurde das Ziel verfolgt, „ein Modell zur Beschreibung der Zustandsbeurteilung von Brücken während ihrer Nutzungsphase zu entwickeln“<sup>251</sup>: Es wurden Zustandsberichte von insgesamt 95 Brücken untersucht und ausgewertet, wobei bei Brücken mit zwei Überbauten jeder Überbau als selbstständige Brücke gezählt wurde. Die Zeitspanne des untersuchten Datenmaterials erstreckte sich über eine Periode von 108 Jahren. Die Daten für die Auswertung stammen aus den Archiven verschiedener Tiefbauämter aus der Schweiz. Die Brücken wurden nach Bauart, Alter, geographischer Lage, Funktion, Brückenlänge und Anzahl der Felder ausgewertet. Für die verschiedenen Bauteile wurden so für die verschiedene Schadensarten Schadeneintrittswahrscheinlichkeiten unter Annahme einer linearen Verteilung berechnet.

### **3.4 Kostenermittlung und Kostensicherheit**

In der Immobilienwirtschaft weisen die einzelnen Projekte hohe Kosten auf. Daher kommt der Kostensicherheit eine bedeutende Aufgabe zu. Eine mangelhafte Kostenermittlung kann oft mit einem großen Schaden bis hin zu Insolvenzfällen verbunden sein. In der Realität steigt die Kostensicherheit mit zunehmender Projektlaufzeit, da immer mehr und detailliertere Informationen zur Verfügung stehen. Daher müssen die notwendigen Informationen so früh wie möglich zur Verfügung stehen und eingearbeitet werden.

#### **3.4.1 Kostenermittlung nach DIN 276**

Die DIN 276 gilt für die Kostenplanung im Bauwesen, insbesondere für die Gliederung und Ermittlung von Kosten. Sie definiert Begriffe und Grundsätze der Kostenplanung im Bauwesen und legt Unterscheidungsmerkmale von Kosten und Bezugseinheiten für Kostengruppen fest. Damit schafft sie die Voraussetzungen für eine einheitliche Vorgehensweise in der Kostenplanung sowie für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Kostenermittlungen. Sie gilt für Kosten von Hochbauten, Ingenieurbauten, Infrastrukturanlagen und Freiflächen.<sup>252</sup>

Die DIN 276 benennt die wichtigsten Stufen der Kostenermittlung und gibt den jeweiligen Detaillierungsgrad an. Auf der obersten Ebene teilt die Norm die Kosten in insgesamt sieben Kostengruppen. Diese Kostengruppen stellen die erste Gliederungsebene dar. Sie sind weiter in eine zweite und dritte Ebene gegliedert. Die Kosten der Kostengruppen 300 und 400 werden auch

---

<sup>250</sup> Vgl. IP Bau: Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten. Impulsprogramm IP Bau. Bundesamt für Konjunkturfüragen. Bern, 1994.

<sup>251</sup> Vgl. Ladner, Marc: Systematisch Auswertung von Schäden an Brücken. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA Dübendorf. Bern 1994, S. 1.2.

<sup>252</sup> Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 276: 2017-07 Entwurf: Kosten im Bauwesen. Berlin 2017, S.4.



als Bauwerkskosten bezeichnet. Innerhalb dieser Kostengruppen sollen die Kosten primär ausführungsorientiert gegliedert werden.

Die Kostenermittlung nach DIN 276 ist in mehrere Stufen unterteilt, deren zeitliche Abfolge sich an den Leistungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOIA) orientiert. Die wesentlichen fünf Stufen der Kostenermittlung nach DIN 276 sind:

- **Kostenrahmen**, „dient als eine Grundlage für die Entscheidung über die Bedarfsplanung sowie für grundsätzliche Wirtschaftlichkeits- und Finanzierungsüberlegungen und zur Festlegung der Kostenvorgabe.“
- **Kostenschätzung**, „dient als eine Grundlage für die Entscheidung über die Vorplanung.“
- **Kostenberechnung**, „dient als eine Grundlage für die Entscheidung über die Entwurfsplanung.“
- **Kostenanschlag**, „dient als eine Grundlage für die Entscheidung über die Ausführungsplanung und die Vorbereitung der Vergabe.“
- **Kostenfeststellung**, „dient zum Nachweis der entstandenen Kosten sowie gegebenenfalls zu Vergleichen und Dokumentationen.“<sup>253</sup>

Neben den allgemeinen Formulierungen bezüglich des Aufbaus der unterschiedlichen detaillierten Stufen der Kostengliederungen gibt die Norm keine Kostenberechnungsverfahren vor. Sie benennt lediglich die verschiedenen Begriffe und die Gliederung der Kosten.

Es ist zu beachten, dass die DIN 276 planungsorientiert ist und die Kosten bauteilorientiert strukturiert. Für die Vergabe der Leistungen müssen die Kosten gewerkebezogen gegliedert werden. Diese vergabeorientierte Kostengliederung basiert auf der Struktur der Vergabeeinheiten der Bauleistung.

### 3.4.2 Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbaus

Der „Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau“ (STLK) umfasst standardisierte Texte zur Beschreibung von Standardbauleistungen im Straßen- und Brückenbau, was die Voraussetzung für die bundeseinheitliche Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung darstellt. Er wird für die ausführungs- oder gewerkeweise Gliederung in Leistungsbereiche angewendet. Er ist nach Leistungsbereichen (LB - Nr.) 101 - 135 aufgeteilt und wird von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) herausgegeben.<sup>254</sup>

---

<sup>253</sup> Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 276:2018-12: Kosten im Bauwesen. Berlin 2018. Ziffer 3.4.1. – 3.4.5.

<sup>254</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau. 2022.

LB- Nr.	Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau	LB- Nr.	Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau
101	Baustelleneinrichtung, Baubegleitende Leistungen	118	Kunstbauten aus Beton und Stahlbeton
102	Entsorgung	119	Mauerwerk für Ingenieurbauten
103	Bodenerkundung	120	Ingenieurbauten aus Stahl
104	Pflanzenlieferung	121	Lager, Übergänge, Geländer für Kunstbauten
105	Derzeit ersetzt durch LB 805 Verkehrssicherung an Arbeitsstellen	122	Korrosionsschutz von Stahl
106	Erdbau	123	Dichtungsschichten und Fugen für Ingenieurbauten
107	Landschaftsbauarbeiten	124	Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen
108	Baugruben, Leitungsräben	125	Tunnelbau
109	Wasserhaltung	126	Kampfmittelräumarbeiten
110	Entwässerung für Straßen	127	Lärmschutzkonstruktionen
111	Entwässerung für Ingenieurbauten	128	Zäune, Holzgeländer
112	Schichten ohne Bindemittel	129	Fahrzeug- Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen
113	Asphaltbauweisen	130	Verkehrsschilder
114	Betonbauweisen	131	Fahrbahnmarkierungen
115	Pflasterdecken, Plattenbeläge, Einfassungen	132	Lichtsignalanlagen
116	Gerüste, Behelfsbrücken	134	Kabelverlegung
117	Verbau, Gründung	136	Ländlicher Wegebau

**Tabelle 3-4: Übersicht der Leistungsbereiche des STLK<sup>255</sup>**

Die LB Nr. 130-135 enthalten Positionsbeschreibungen für Verkehrsschilder, Fahrbahnmarkierungen, Lichtsignalanlagen und Kabelverlegung. Sie werden allerdings nicht auf die technischen Anlagen im Tunnel angewendet, da sie der erforderlichen Individualität der technischen Anlagen im Tunnelbau nicht gerecht werden und somit nur als Ergänzung dienen.

### 3.4.3 Verfahren zur Kostenermittlung

MAYER beschreibt in seiner Arbeit drei unterschiedliche Verfahren zur Kostenermittlung. Das erste Verfahren ermittelt die Gesamtkosten sehr pauschal, indem es eine Bezugsmenge mit einem Kostenkennwert multipliziert. Somit wird das gesamte Bauwerk anhand einer Bezugsmenge erfasst. Kostenkennwerte können u.a. aus den Tabellen des BKI entnommen werden, häufig werden aber Kostenkennwerte aus eigenen Referenzprojekten generiert.<sup>256</sup> Diese

<sup>255</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau. 2022.

<sup>256</sup> Vgl. Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung: Entwicklung eines Kosten-Prognose-Modells für Bauwerkskosten im Hochbau. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2013, S. 22-25.

Form der Kostenermittlung weist allerdings eine starke Streuung auf. Die Projekte unterscheiden sich in zu vielen Parametern, um nur über einen Kostenkennwert ermittelt werden zu können.<sup>257/258</sup>

Das zweite Verfahren berechnet die Kosten mithilfe von mehreren Bezugsmengen und Kostenkennwerten und stellt damit eine Verfeinerung des ersten Verfahrens dar. Die DIN 277 gliedert die BGF in verschiedene Flächenarten, welche mit unterschiedlichen Kennwerten multipliziert und aufsummiert werden.<sup>259</sup> Ein Nachteil dieser Methode ist, dass auch hier kein Mehrwert für die Kostensicherheit geschaffen wird. Die Trennung der Flächen erhöht die Kostensicherheit nur dann, wenn die Kostenkennwerte bei einem technisch gleichartigen Bauwerk, das unter gleichen wirtschaftlichen Bedingungen errichtet wurde, entnommen worden sind. Die Genauigkeit der Kostenberechnung hängt also von der Qualität der Kostenkennwerte ab.<sup>260</sup>

Das dritte Verfahren – auch als ausführungsorientiertes Verfahren bezeichnet – gliedert die Kosten nicht nach DIN 276, sondern richtet sich nach den Vergabeeinheiten oder Gewerken. Der Vorteil hierbei ist, dass sich auch die Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung auf diese Gliederung beziehen. Alle erforderlichen Einzelleistungen eines Gewerks werden mit den jeweiligen Kostenkennwerten multipliziert und ergeben in Summe die Gesamtkosten des Bauwerks. Die Einzelleistungen werden als Leistungspositionen in Leistungsverzeichnissen aufgelistet. Daher ist das Leistungsverzeichnis schon in einer sehr frühen Phase zu erstellen, was einen großen zeitlichen Aufwand darstellt. Um diesen Aufwand zu umgehen, entwickelte Mayer das Verfahren nach Leitpositionen. Leitpositionen sind jene 20 % aller Positionen, die 80 % der Gesamtkosten ausmachen. Hier werden also nur die Leitpositionen mit dem jeweiligen Kostenkennwert multipliziert. Die restlichen 20 % der Kosten werden bei der vereinfachten Variante dieses Verfahrens vernachlässigt.<sup>261</sup>

### 3.4.4 Kostenkennwerte

Für eine aussagekräftige Kostenermittlung ist die Verwendung von Kostenkennwerten essentiell. Kostenkennwerte sind Werte, die das Verhältnis von Kosten zu einer Bezugseinheit einer einzelnen Position darstellen, wobei die Bezugseinheit geometrisch oder funktional sein kann.<sup>262</sup> Eine geometrische Bezugseinheit ist bspw. eine Fläche (Quadratmeter), während die Verkehrsmenge (Anzahl an Fahrzeugen pro Tag) bspw. eine funktionale Bezugsmenge beschreibt.

---

<sup>257</sup> Vgl. Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2013, S.40-41.

<sup>258</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang; Tilke, Carsten: Unsicherheiten bei der Realisierung von Bauprojekten – Grenzen einer wahrscheinlichkeitsbasierten Risikoanalyse. In: Bauingenieur. Band 89. Düsseldorf 2014. S. 272- 282.

<sup>259</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 277-1: Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen.

<sup>260</sup> Vgl. Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2013, S.41.

<sup>261</sup> Vgl. Mayer, Franz Xaver: Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2013, S.24.

<sup>262</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 276:2018-12: Kosten im Bauwesen. Berlin 2018, S. 6.

Für den Hochbau existiert eine breite Auswahl an Kostenkennwert-Sammlungen. Die wohl bekannteste Sammlung stellt das Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) dar. Über die Analyse von bereits abgerechneten Bauvorhaben werden Kostenkennwerte für die verschiedenen Ebenen der Kostenermittlung bereitgestellt. Die statistisch ermittelten Daten dienen als Orientierungswert, die vom Anwender für seine individuelle Anwendung eingeschätzt werden müssen. Das BKI beinhaltet allerdings keine Werte für Ingenieurbauten.<sup>263</sup> Analog zu den BKI Baukosten Tabellen bietet auch SIRADOS Fachbücher mit Kostenkennwerten über die verschiedenen Stufen der Kostenermittlung an. Neben Baukostenkatalogen für den Hochbau existieren hierbei auch solche mit Kostenkennwerten für den Tief-, den Landschafts- und Gartenbau. Die Kostenkennwerte sind bei den BKI-Tabellen ebenfalls bis in die dritte Ebene der Kostengliederung gegliedert.

Für die Kostengruppen 100 „Grundstück“, 200 „vorbereitende Maßnahmen“, 500 „Außenanlagen und Freiflächen“, 600 „Ausstattung und Kunstwerke“ sowie 700 „Baunebenkosten“ existieren in der Regel keine allgemeingültigen Kostenkennwerte. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Randbedingungen der einzelnen Projekte sind diese Kostengruppen nur schwer miteinander vergleichbar. Daher existieren nur auf den Einzelfall abgestimmte Kostenkennwerte.<sup>264</sup>

### 3.4.5 Einflussfaktoren auf Kostenkennwerte

#### 3.4.5.1 Bauwerks-Merkmal-faktoren

Bauprojekte besitzen einen individuellen Charakter, der einen erheblichen Einfluss auf die Baukosten zur Folge hat. Zu den bedeutendsten Einflüssen gehören u.a.:

**Größe:** Kleinere Projekte sind relativ gesehen mit einem höheren Aufwand verbunden. Aus diesem Grund sind die Kosten pro Einheit bei solchen Projekten in der Regel höher.<sup>265</sup> Dies liegt u.a.

- am relativen Mehraufwand im Bereich Personal,
- meist höhere Auslastung der Maschinen, Geräte und Baustelleneinrichtung,
- den i.d.R. bei kleinen Projekten nicht gewährten möglichen Mengenrabatten und wegfallenden Wiederholungseffekten.

**Lage:** Schwierige Grundstücksverhältnisse, die Einflüsse auf die Bauweise und den Bauablauf haben, können bei der Ausschreibung angegeben und von den Bauunternehmen in der Kalkulation berücksichtigt werden. Auch die Anlieferungsmöglichkeit der Baumaterialien an den Einbauort ist insbesondere beim Brückenbau ein maßgeblicher Einflussfaktor, der je nach Lage der Brücke in Verbindung mit der Topografie des Geländes preislich unterschiedlich ins Gewicht fallen kann.<sup>266</sup>

---

<sup>263</sup> Vgl. Architektenkammern, Baukosteninformationszentrum Deutscher: BKI-Baukosten 2017 Neubau. Stuttgart 2017, S.10–11.

<sup>264</sup> Vgl. Siemon, Klaus D.: Baukostenplanung und -steuerung bei Neu- und Umbauten. Wiesbaden 2016, S. 18.

<sup>265</sup> Vgl. Bielefeld, Bert; Schneider, Roland: Kostenplanung. 1. Edition. Basel 2014, S.22.

<sup>266</sup> Vgl. Bielefeld, Bert; Schneider, Roland: Kostenplanung. 1. Edition. Basel 2014, S.22.

**Bauen im Bestand:** Bei zu sanierenden Bestandsbauwerken sind gegenüber dem Neubau erhebliche Mehrkosten zu erwarten, da Bauunternehmen häufig für Bestandsbauwerke höhere Aufwandswerte heranziehen.<sup>267</sup>

**Bauzeit:** Unter Umständen wie bspw. Unterbrechungen oder Beschleunigungsmaßnahmen, kann auch die Bauzeit eines Projektes Auswirkungen auf die Kosten haben. Werden Mitarbeiter aufgrund von notwendigen Ruhephasen in weiterhin genutzten Bestandsprojekten nur in kurzen Abschnitten eingesetzt, müssen die Lohnkosten auch für die unproduktiven Zwischenzeiten einkalkuliert werden, weshalb entsprechend zusätzliche Personal- und Maschinenkosten zu kalkulieren sind. Die Vorhaltung der Baustelleneinrichtung ist ebenfalls für die Gesamtkosten zu berücksichtigen, auch wenn sich diese nicht im physischen Endergebnis widerspiegelt.<sup>268</sup>

**Schwierigkeitsgrad/Technische Anforderungen:** Weiterhin kann der Schwierigkeitsgrad eines Bauwerks die Kostenkennwerte beeinflussen. Um den Schwierigkeitsgrad eines Bauwerks zu bestimmen, definiert die HOAI vier verschiedene Honorarzonen in zwei Bereichen: Honorarzonen 1 bis 4 jeweils in Objektplanung und in Tragwerksplanung. Da die Honorarzone das Honorar der Planer beeinflusst, ist der Schwierigkeitsgrad eines Bauwerks ein weiteres für die Höhe der Kostenkennwerte relevantes Kriterium.

**Wiederholungsfaktor:** Die HOAI sieht für die Wiederholungsleistungen eine Abminderung des Honorars vor: „Umfasst ein Auftrag Grundleistungen, die bereits Gegenstand eines anderen Auftrags über ein gleiches Gebäude, Ingenieurbauwerk oder Tragwerk zwischen den Vertragsparteien waren, so sind die Prozentsätze der beauftragten Leistungsphasen in Bezug auf den neuen Auftrag auch dann anzuwenden, wenn die Grundleistungen nicht im zeitlichen oder örtlichen Zusammenhang erbracht werden sollen.“<sup>269</sup> Da dieser Aspekt einen Einfluss auf das Honorar des Planers haben kann, kann der Wiederholungsfaktor einen Einfluss auf die Kosten eines Bauwerks haben.

### 3.4.5.2 Makroökonomische Einflussfaktoren

Neben den charakteristischen Einflussfaktoren spielen auch makroökonomische Tendenzen eine wesentliche Rolle bei der Entstehung der Kosten. Zu den wichtigsten makroökonomischen Faktoren zählen:

**Konjunktur:** Die regionale, überregionale oder auch internationale Konjunkturlage ist kostenbeeinflussend. Bei der Kalkulation der Bauleistungspreise ziehen Bauunternehmen zudem in Betracht, wie ihre aktuelle Auftragslage ist. Falls eine hohe Auslastung vorhanden ist, fallen die Angebotspreise um einiges höher aus, als wenn eine schlechte Auftragslage herrscht. Teilweise können auf Grund dieser Einflussgröße die Marktpreise um 20 bis 30 % schwanken.<sup>270</sup>

**Regionalfaktor:** Der Regionalfaktor berücksichtigt die Höhe des Lohnniveaus in verschiedenen Regionen. Dies ist vor allem bei in der Herstellung arbeitsintensiven Elementen, welche i.d.R.

---

<sup>267</sup> Vgl. Bielefeld, Bert; Schneider, Roland: Kostenplanung. 1. Edition. Basel 2014, S.24.

<sup>268</sup> Vgl. Bielefeld, Bert; Schneider, Roland: Kostenplanung. 1. Edition. Basel 2014, S.23.

<sup>269</sup> Vgl. HOAI: Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, § 11 Abs. 4.

<sup>270</sup> Vgl. Bielefeld, Bert; Schneider, Roland: Kostenplanung. 1. Edition. Basel 2014, S.24.

hohe Lohnkosten beinhalten, zu berücksichtigen. Lieferzeiten, Materialpreise sowie die Montage sind Variablen, die die Kostenkennwerte beeinflussen.<sup>271</sup>

**Preisindizes:** Der Zeitraum zwischen Planungsbeginn mit einer sehr oberflächlichen Kostenschätzung auf Ebene der Bedarfsplanung und Abschluss der Planung mit detaillierter Kostenberechnung nach der Genehmigungsplanung variiert in zeitlicher Hinsicht und ist für verschiedene Projekte unterschiedlich lang. Aufgrund dieser teilweise langen Zeiträume kann sich die Kostengrundlage eines Bauprojekts durch die Preisentwicklung ändern. Daher sind die dem jeweiligen Planungsstand zugrunde liegenden Kostenkennwerte zu überprüfen und ggf. zu aktualisieren.<sup>272</sup>

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes (Destatis) sind die Preise für Bauleistungen im Straßenbau in Deutschland im Jahr 2020 gegenüber 2011 um 29,1 % gestiegen. Für Brückenbauwerke stiegen die Kosten im gleichen Zeitraum um ca. 25 %.<sup>273</sup>

### 3.4.6 Kostenprognosemodelle zur Erhaltung von Brückenbauwerken

WITTKÉ<sup>274</sup>, ROSE<sup>275</sup> und FORKERT<sup>276</sup> entwickelten in den 1980er Jahren Kostenprognosemodelle für die Erhaltung von Brückenbauwerken. Während das von WITTKÉ entwickelte Modell auf der Auswertung von Schadensdaten basiert und die entstehenden Kosten der einzelnen Schadensfälle in Abhängigkeit von der Schadensklasse angesetzt werden, stellte ROSE bei seiner Auswertung verschiedener Instandsetzungsmaßnahmen an Brückenbauwerken einen engen Zusammenhang zwischen Brückengröße und den Kosten fest. Er definierte fünf verschiedene „Flächenklassen“, um die Flächenabhängigkeit der Kosten zu berücksichtigen. Das von FORKERT entwickelte Verfahren basiert auf der Instandhaltungsstrategie nach Kontrolle, zielt aber auch auf langfristige Einschätzungen von zeitabhängigen Schadensarten ab. Das Modell baut auf den Ergebnissen der Bauwerksprüfungen auf. Durch die enge Verknüpfung der Kosten mit bestimmten Schadensarten innerhalb dieser Modelle sind diese Modelle nicht für eine langfristige Kostenprognose geeignet, welche bereits in frühen Projektphasen angewendet werden kann.

Ein weiteres Modell ist das Modell des Bund/ Länder-Fachausschusses Brücken- und Ingenieurbau, welches zu den Strategiemodellverfahren zählt und den Ansatz verfolgt, dass die einzelnen Bauwerkskomponenten unterschiedliche Lebensdauern aufweisen und nach festgelegten Zeitabständen instandgesetzt werden müssen. Die Kosten werden über mittlere Kostenansätze für die Erneuerung oder Instandsetzung der verschiedenen Bauwerkskomponenten bezogen auf die Brückenfläche angegeben.<sup>277</sup>

---

<sup>271</sup> Vgl. Bielefeld, Bert; Schneider, Roland: Kostenplanung. 1. Edition. Basel 2014, S.24.

<sup>272</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): AKVS 2014: Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen 11/20.

<sup>273</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt: Investitionen in Brückenbau: Pressemitteilung Nr. N 048 vom 21.07.2021.

<sup>274</sup> Vgl. Wittke, Berndt.: Darstellung eines Verfahrens zur Beschreibung und Bewertung von Schadensfällen an Bauwerken im Hinblick auf eine Risikoabschätzung, gezeigt an Spannbetonbrücken. Dissertation. Technische Universität Darmstadt 1986.

<sup>275</sup> Vgl. Rose, Karl: Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken. Dissertation, Düsseldorf 1989.

<sup>276</sup> Vgl. Forkert, Lothar: Verfahren zur Prognose von Schadensentwicklungen bei einer kostenoptimierten Brückeninstandhaltung. Düsseldorf 1990.

<sup>277</sup> Vgl. König, Gert; Maurer, Reinhard; Zichner, Tilman: Spannbeton- Bewehrung im Brückenbau. Berlin, Heidelberg 1986. S. 269.

### 3.4.7 Verfahren und Ermittlung zur Prognose der Lebenszykluskosten

#### Bauwerksmanagement - System (BMS)

Da das deutsche Fernstraßennetz hauptsächlich bis in die 1970er Jahre aufgebaut wurde und seitdem der Zuwachs nur noch minimal ist, fand in diesem Bereich in den letzten Jahren ein Umdenken von Neubaumaßnahmen hin zu Erhaltungsmaßnahmen statt.<sup>278</sup> Auf Grund der zunehmenden Verkehrsbelastung sowie der Alterung der Bauwerke ist ein erhöhter Bedarf an Erhaltungsmaßnahmen vorhanden. Daher entwickelte die Bundesanstalt für Straßenwesen im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur ein Bauwerksmanagement-System (BMS), welches den kompletten Bauwerksbestand sowie den Zustand der Bauwerke erfasst und eine entsprechende Erhaltungsplanung auf Netz- sowie Objektebene erstellt. Ziel dieses Management-Systems ist eine systematische Straßenerhaltung nach bundeseinheitlichen Kriterien, um mit den zur Verfügung stehenden Finanzmitteln ein bestmögliches Erhaltungsniveau sicherzustellen. Für die Erfassung aller Bauwerke ist zunächst eine umfangreiche Datenbank notwendig, die alle relevanten Bauwerks- und Schadensdaten enthält.<sup>279</sup> In Abbildung 3-17 ist der grundsätzliche Aufbau eines BMS dargestellt.

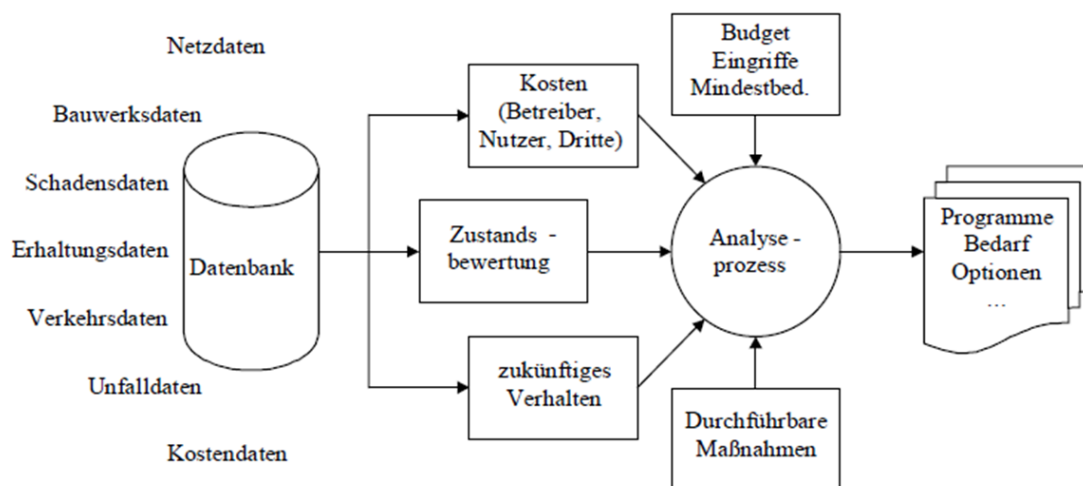


Abbildung 3-17: Aufbau eines Bauwerk-Management-Systems<sup>280</sup>

Im Zuge der Bauwerksprüfungen werden alle festgestellten Schäden erfasst und für jedes Teilbauwerk wird die Zustandsnote ermittelt (vgl. Kapitel 3.2.1 und 3.2.2). Diese Bauwerksdaten sind Grundlage für die Erhaltungsplanungen. Die Erhaltungsprogramme werden mittels eines „Bottom Up“ Systems ermittelt. Dabei werden ausgehend von den Ergebnissen der Bauwerksprüfungen objektbezogene Analysen und Bewertungen durchgeführt, auf Netzebene optimiert und zu Erhaltungsprogrammen zusammengefasst.<sup>281</sup> Weitere Eingangsgrößen für das

<sup>278</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2016. Berlin 2018, S. 150.

<sup>279</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2016. Berlin 2018.

<sup>280</sup> Haardt, Peter: Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz- Stufe 1 und 2. Im Auftrag von: Bundesanstalt für Straßenwesen. August 2002. S. 15.

<sup>281</sup> Vgl. Haardt, Peter: Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz- Stufe 1 und 2. Im Auftrag von: Bundesanstalt für Straßenwesen. August 2002. S. 14.

BMS sind neben den Bauwerks- und Zustandsdaten Informationen über das zur Verfügung stehende Budget, über Mindestbedingungen sowie über die durchführbaren Maßnahmen. Die einzelnen Erhaltungsprogramme münden in die Maßnahmebewertung und -auswahl. Bei komplexen Schadensbildern erfolgt über die Bauwerksprüfungen hinaus eine detaillierte, objektbezogene Schadensanalyse, um geeignete Erhaltungsmaßnahmen festzulegen.<sup>282</sup>

Die Realisierung der oben beschriebenen Verfahren erfolgt in einzelnen Datenverarbeitungsprogrammen. Für die Datenbereitstellung wurde das Programmsystem SIB-Bauwerke in das System integriert.<sup>283</sup> Im Rahmen des Forschungsvorhaben der BAST wurden für die Bewertung der Erhaltungsmaßnahmen auf Objektebene, für die Optimierung der Erhaltungsplanung auf Netzebene sowie für die Visualisierung der Auswirkungen von Erhaltungsszenarien und -strategien neue DV- Programme entwickelt. Diese DV-Programmen basieren auf komplexen Software-Systemen und sind nicht in der Lage, bereits in frühen Projektphasen die zukünftigen Investitionskosten vorherzusagen. Mit Hilfe des BMS ist es lediglich möglich, Instandhaltungsprogramme zu entwickeln, wenn das Bauteil bereits beschädigt ist und dies im Zuge der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 ermittelt wurde. Für Neubauten aber ist keine Kostenvorhersage möglich, weder für die Erstinvestitionskosten noch für die zukünftigen Investitionskosten. Sowohl für eine detaillierte Budgetplanung als auch für Variantenvergleiche im Zuge der Planung des Bauwerks ist es aber unerlässlich, bereits in frühen Projektphasen über die zukünftigen Investitionskosten Auskunft zu bekommen.

#### **Lebenszykluskostenanalyse nach VOGT**

VOGT<sup>284</sup> entwickelte in seiner Dissertation einen Berechnungsalgorithmus zur Analyse und Visualisierung der Lebenszykluskosten von Straßentunneln. Das Modell soll es ermöglichen, über zwei verschiedene Modellvarianten die Kosten für einen neu zu errichtenden Tunnel sowie einen Bestandstunnel berechnen zu können. Sein Modell setzt sich aus verschiedenen Komponenten eines Tunnels zusammen, wobei jede Komponente ein kostenverursachendes Element des Tunnels darstellt. In diesen sogenannten Modultabellen sind die theoretischen Nutzungsdauern sowie die erforderliche Anzahl an einzelnen Komponenten enthalten. VOGT differenziert in seiner Arbeit zwei verschiedene Anteile, aus denen sich die Folgekosten zusammensetzen. Den ersten Anteil bilden die Betriebskosten, den zweiten die Instandsetzungskosten. In beiden Fällen berechnet er die Folgekostenanteile über die Initialkosten. Über den Faktor  $e_{k,j}$  [-], welcher den Austauschgrad einer Einheit widerspiegelt und sich aus der Nutzungsdauer der jeweiligen Komponente berechnet, ermittelt er die Instandsetzungskosten. Die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten für Energie und Instandhaltung werden einer weiteren Faktorisierung unterzogen<sup>285</sup>

---

<sup>282</sup> Vgl. Haardt, Peter: Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz- Stufe 1 und 2. Im Auftrag von: Bundesanstalt für Straßenwesen. August 2002. S. 17.

<sup>283</sup> SIB-Bauwerke ist ein Programmsystem zur einheitlichen Erfassung der Bauwerksdaten auf Grundlage des ASB-ING (Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten).

<sup>284</sup> Vgl. Vogt, Peter: Modell zu Lebenszykluskosten von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften. Bochum 2012.

<sup>285</sup> Vgl. Vogt, Peter: Modell zu Lebenszykluskosten von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften. Bochum 2012, S. 125-155.



### **Ökonomische Optimierung von Straßentunneln nach ENGELHARDT**

ENGELHARDT beschäftigt sich mit der Lebenszykluskostenanalyse von Tunnelbauwerken mit dem Leitziel der „ökonomischen Optimierung von Tunnelbauwerken der Straßeninfrastruktur“.<sup>286</sup> Er entwickelt ein modulares Prozessmodell, welches aus verschiedenen unabhängigen Subsystemen besteht. Die unterste Ebene stellt die Bauteile eines Tunnels dar, welche mit den entsprechenden Kosten sowie den erforderlichen Maßnahmen zur Erhaltung des Soll-Zustandes versehen sind. Die Kosten werden dabei in Erst- und Folgekosten differenziert. Sein Modell wendet er für einen exemplarischen Mustertunnel an. Demnach basiert die Quantifizierung der Kosten auf den spezifischen Eingangsgrößen des Mustertunnels.<sup>287</sup>

Die Höhe der Instandsetzungskosten wird von den spezifischen Objekteigenschaften und den Einflussfaktoren auf ein Bauwerk beeinflusst. Die Berechnungsverfahren nach VOGT und ENGELHARDT berücksichtigen diese Kosteneinflussgrößen allerdings nicht.

### **Gesamtwirtschaftliche Betrachtung von Erhaltungsstrategien**

Die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen führte 2015 im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur ein Forschungsvorhaben zum Thema „Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien“ durch. Das Forschungsvorhaben zielt darauf ab, Baulastträgerkosten und Nutzerkosten miteinander zu verbinden, um so eine gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen vorzunehmen.<sup>288</sup> Als systematisches Straßenerhaltungssystem wurde 1998 bundesweit das sogenannte Pavement - Management - System (PMS) eingeführt (vgl. Kapitel 3.4.8). Dieses System ermöglicht eine Maßnahmenreihung nach qualitativen und finanziellen Vorgaben mit dem Ziel einer nachhaltigen Substanzerhaltung, berücksichtigt aber keine Nutzerkosten. Zusätzliche Nutzerkosten können durch schlechten Fahrbahnzustand entstehen, der sich merklich auf den Fahrkomfort auswirkt oder aber aus Sicherheitsgründen zu einer Herabsetzung der zulässigen Geschwindigkeit führt. Sind Baumaßnahmen an Straßen notwendig, kann dies zu Überholverböten, Kapazitätsreduktionen infolge ungünstigerer Behelfsverkehrsführungen oder durch eingeschränkte Verkehrsräume und ebenfalls zu Geschwindigkeitsreduktionen führen, was ebenfalls zusätzliche Nutzerkosten zur Folge hat.

### **Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase**

In einem Forschungsvorhaben untersuchten ZIMMERMANN ET AL. die Branchen Straßenverkehr und öffentliche Wasser- und Abwasserversorgung hinsichtlich ihres Infrastrukturmanagements. Hierfür erfolgte einerseits eine Quantifizierung des Instandsetzungsrückstau sowie des notwendigen Intervalls, um diesen abzubauen. Andererseits wurde die Höhe der zukünftigen Investitionen bestimmt, die notwendig sind, um keinen neuen Instandsetzungsrückstau entstehen

---

<sup>286</sup> Vgl. Engelhardt, Stephan: Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken. Dissertation. Universität der Bundeswehr München. Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften. München 2015, S.121.

<sup>287</sup> Vgl. Engelhardt, Stephan: Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken. Dissertation. Universität der Bundeswehr München. Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften. München 2015, S.149-151.

<sup>288</sup> Vgl. Socina, Mihai; Komma, Christian: Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien. Forschung – Straßenbau und Verkehrstechnik 1113. Bremen 2015.

zu lassen. Die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten erfolgte auf Grundlage eines aktiven Instandhaltungsmanagements entsprechend der Lebensdauern der Bauteile.<sup>289</sup>

Der Instandsetzungsrückstau der Infrastruktur beläuft sich auf insgesamt 284,32 Mrd. Euro. Der größte Teil entfällt auf die Leitungsinfrastruktur. Allein auf die Abwasserentsorgung entfallen über 50 % der notwendigen Mittel zur Rückstaubeseitigung.<sup>290</sup> Abbildung 3-18 zeigt die Verteilung des Instandsetzungsrückstaus auf die einzelnen Bereiche der Infrastruktur.

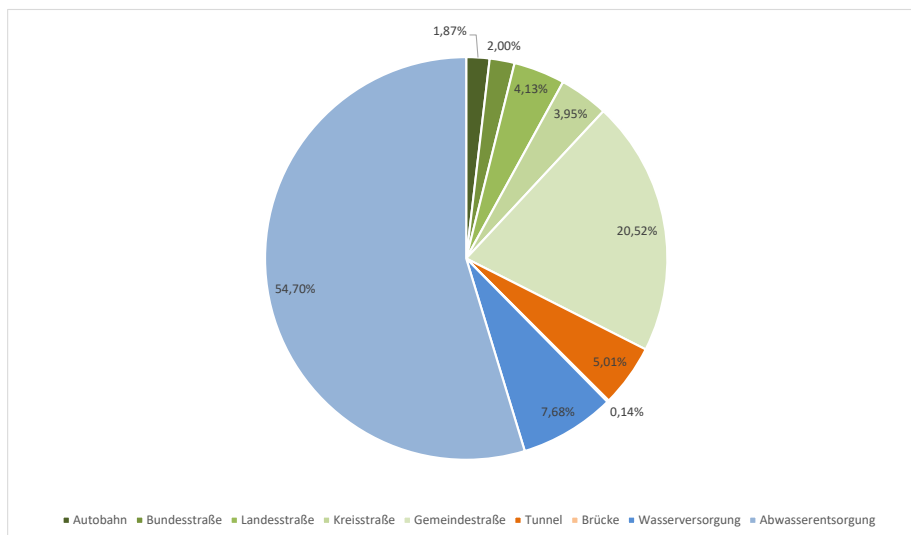


Abbildung 3-18: Verteilung des Instandsetzungsrückstaus<sup>291</sup>

Um diesen Instandsetzungsrückstau zu beseitigen, müssen neben den Investitionen für den Neubau und den planmäßig zu tätigen zukünftigen Investitionskosten weitere Mittel zur Verfügung gestellt werden. Als Beispiel seien hier die Bundesautobahnen angeführt. Diese weisen einen Instandsetzungsrückstau in Höhe von 5,32 Mrd. Euro auf. Die planmäßigen zukünftigen Investitionskosten für Herstellung und Instandsetzung betragen in 50 Jahren 145,15 Mrd. Euro. Addiert man den Instandsetzungsrückstau dazu, müssen in den nächsten 50 Jahren insgesamt 150,47 Mrd. Euro investiert werden, sofern kein neuer Rückstau entstehen soll.<sup>292</sup> Den Berechnungen liegt die Annahme eines uneingeschränkten aktiven Instandhaltungsmanagements zugrunde.<sup>293</sup> Wird für die Beseitigung des Rückstaus ein Intervall von 15 Jahren angenommen, ergeben sich folgende Investitionen:

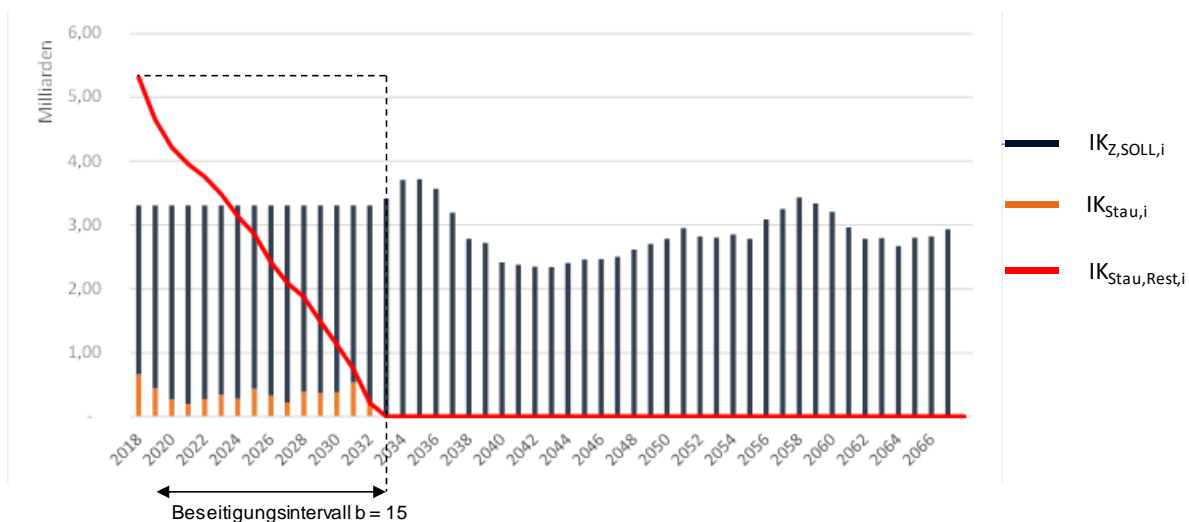
<sup>289</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht, S. 13.

<sup>290</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht, S. 22.

<sup>291</sup> Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht, S. 23.

<sup>292</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht, S. 26.

<sup>293</sup> Vgl. Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht, S. 171.



**Abbildung 3-19: Migration des Instandsetzungsrückstaus des Netzes von Bundesautobahnen<sup>294</sup>**

Vergleicht man die berechneten Investitionen mit den Ausgaben aus Abbildung 3-8 fällt auf, dass es höherer Investitionen bedarf, um in Zukunft eine funktionsfähige Infrastruktur bereit zu stellen. Für eine aktive Instandhaltung müssen die notwendigen Mittel durchweg höher ausfallen als im Bundeshaushalt veranschlagt.

### Kostenermittlung mit Standardraumstrukturen

Das Konzept der Standardraumstruktur (SRS) wurde entwickelt, um die Berechnung von Lebenszykluskosten von Gebäuden bereits in frühen Projektphasen auch ohne die Grundlage einer hinreichenden Planung zu ermöglichen. Es stellt eine effiziente und wirtschaftliche Alternative zur herkömmlichen Kosten-Prognose-Berechnung dar und kann ebenfalls die geeignete Basis für eine Realisierungsentscheidung schaffen. Um eine möglichst genaue Kostenermittlung auch schon in frühen Projektphasen durchführen zu können, sind entsprechende Informationen über das Bauwerk notwendig. Eine derart detaillierte Kostenermittlung in frühen Projektphasen würde einen unverhältnismäßig hohen Aufwand bedeuten. Die Methodik der Standardraumstrukturen verkürzt diesen Prozess. Diese stellen ein baukastenähnliches System dar, das eine Standardisierung des Gebäudes vornimmt und mit Hilfe dessen trotz der geringen Informationsvielfalt erste Aussagen zu den Kosten gemacht werden können. Dabei werden verschiedene Raumtypen hinsichtlich ihrer unterschiedlichen Funktionen definiert, welche zusammen dem individuellen, realen Bauwerk entsprechen. Für die Anwendung der Standardräume ist es nicht notwendig, dass die vollständige Ausführungsplanung bereits vorliegt, allerdings müssen die Art und das Maß der baulichen Nutzung für das jeweilige Grundstück bereits festgelegt sein. Mit den planerischen Festlegungen aus der Vorplanung wie Geometrie, Ausstattung und Anzahl der Räume können die Berechnungen durchgeführt werden.<sup>295</sup>

<sup>294</sup> Zimmermann, Josef; Hoffeller, Marina et al.: Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase. Forschungsbericht, S. 27.

<sup>295</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 198.

Den einzelnen Standardräumen können innerhalb eines Gebäudetyps bestimmte Funktionen zugeschrieben werden, so dass jedem Standardraum die für ihn typischen Bauteile sowie Kostenkennwerte und Nutzungsdauern zugeordnet werden können. Das Gebäude wird in übergeordnete sowie nutzungsspezifische Standardräume unterteilt. Die übergeordneten Standardräume sind unabhängig von der Nutzung und beziehen sich immer auf das ganze Gebäude. Die nutzungsspezifischen Standardräume beziehen sich nur auf die Ausbaustruktur (z.B. Technikräume, Büroräume) und enthalten demzufolge auch nur Ausbaugewerke. Am Anfang der Standardraumstruktur stehen dabei die übergeordneten Standardräume, sie bilden das Gerüst des Gebäudes, in welches dann die nutzungsspezifischen Standardräume eingefügt werden.<sup>296</sup>

Jeder Standardraum besteht aus einer geometrisch definierten Fläche. Ein Einzelbüro ist ein sogenannter grundflächenbezogener Standardraum, welcher sich aus den Abmessungen Breite, Tiefe und Höhe zusammensetzt bzw. aus den Boden-, Decken- und Wandflächen. Daneben gibt es noch die gebäudehüllflächenbezogenen Standardräume, welche sich auf die Außenwand- und Dachflächen beziehen und sich aus einer variablen Breite und Höhe zusammensetzen. So werden alle Flächenarten des betrachteten Gebäudes definiert und daraus die Standardräume abgeleitet. Neben den verschiedenen Abmessungen werden jedem Bauteil eines Standardraums für die Kostenprognose Kostenkennwerte sowie Lebensdauern für eine zukünftige Investitionsplanung zugeordnet. Da es für die Instandhaltungsplanung nicht zielführend ist, das Bauwerk als Ganzes zu betrachten, bildet das Modell der Standardräume eine sinnvolle Methode zur Berechnung der zukünftigen Investitionskosten. Die einzelnen Standardräume bilden das Bauwerk als Ganzes, unterteilt in einzelne Funktionseinheiten ab, welche auf Grund ihrer Funktion und der begrenzten Lebensdauer individuelle Instandhaltungsanforderungen aufweisen.<sup>297</sup>

### 3.4.8 Pavement Management System - PMS

Das Pavement-Management-System (PMS) ist ein rechnergestütztes Programm und dient der operativen und strategischen Erhaltungsplanung von Bundesfernstraßen. Seit der Erstanwendung im Jahr 1999 erfolgen kontinuierliche Verbesserungen und Weiterentwicklungen des Systems. Als Eingabeparameter für das Pavement-Management-System (PMS) dienen die Ergebnisse der Zustandserfassung- und -bewertung der Prüfungen nach DIN 1076, welche den aktuellen Zustand der Bauwerke abbilden. Durch Vorhersagen über die Zustandsänderungen ist es möglich, Erhaltungsmaßnahmen für Intervalle, die in der Zukunft liegen, zu planen. Hierzu dienen bekannte Verläufe für die Fahrbahnoberfläche und die Fahrbahnsubstanz, mit denen der Verlauf von Zustandsänderungen abgeschätzt werden kann.<sup>298</sup>

Das PMS ist modulartig aufgebaut. Es umfasst folgende acht Module:

---

<sup>296</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 198.

<sup>297</sup> Vgl. auch: Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian: Kostenermittlung in frühen Projektphasen mit Standardraumstrukturen im Wohnungsbau. In: Bauingenieur. Ausgabe 10/2019.

<sup>298</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Pavement-Management-System (PMS). Internetquelle.

Modul 1	Bildung von homogenen Abschnitten
Modul 2	Auswahl zur Erhaltung anstehender Abschnitte
Modul 3	Mängelanalyse/ Schadensursachen
Modul 4	Prognose der Zustandsänderungen
Modul 5	Bautechnisch mögliche Erhaltungsmaßnahmen
Modul 6	Bewertung und Reihung der Maßnahmevarianten
Modul 7	Optimierung der Maßnahmevarianten bei Budgetbegrenzung
Modul 8	Kurz/- mittelfristiges Erhaltungsprogramm

Die Ergebnisse des PMS stellen allerdings nur eine objektive Entscheidungsgrundlage dar, die als Unterstützung für den planenden Ingenieur zu verstehen sind.<sup>299</sup>

### 3.5 Zuverlässigkeitsanalyse

Um die Produktzuverlässigkeit bei gegebenen zukünftigen Bedingungen prognostizieren zu können, werden sogenannte Zuverlässigkeitsanalysen angewendet. Eine für diese Arbeit passende Definition des Begriffes Zuverlässigkeit formulierten BERTSCHE & LECHNER:

*„Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“<sup>300</sup>*

Das Ziel solcher Analysen ist die Modellierung von Lebensdaten, so dass Aussagen über die Zeit  $T$  gemacht werden können, zu der das interessierende Ereignis (i.d.R. der Ausfall des Bauteils) eintritt. Daraus folgt, dass  $T$  eine nicht- negative Zufallsvariable mit einer bestimmten Verteilungsfunktion  $F$  ist, durch die das Ausfallverhalten beschrieben werden kann. WILHELM führt an, dass es im Bereich des Bauwesens keine statistische Beschreibung der Lebensdauer von Bauteilen über Verteilungsfunktionen gibt. Derartige Beschreibungen kommen hauptsächlich aus dem Bereich des Maschinenbaus.<sup>301</sup>

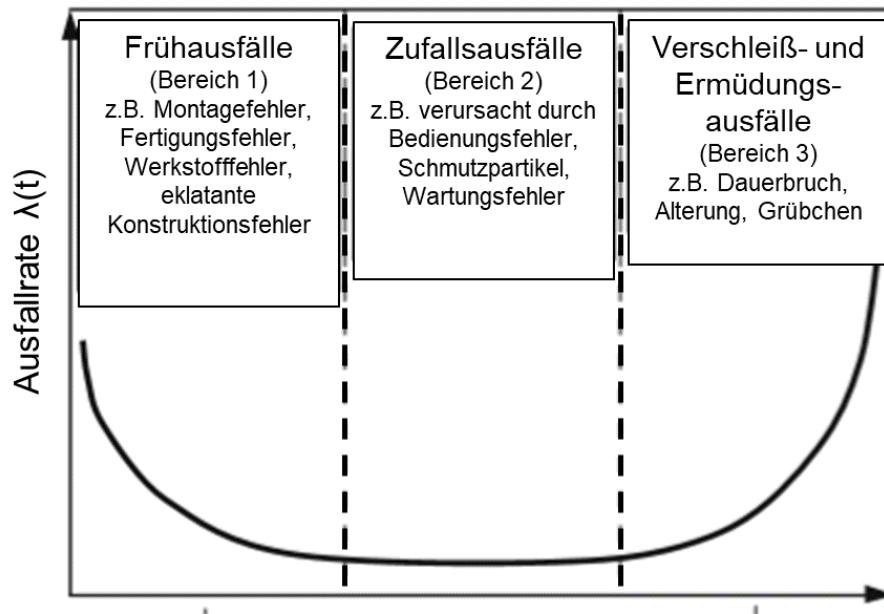
Die Ausfallrate eines Elements verläuft nicht linear, sondern lässt sich gem. Abbildung 3-20 in drei Phasen einteilen („Badewannenkurve“):

---

<sup>299</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Pavement-Management-System (PMS). Internetquelle.

<sup>300</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 20.

<sup>301</sup> Vgl. Wilhelm, Martin: Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie. Berlin 2011, S. 97.


 Abbildung 3-20: Badewannenkurve<sup>302</sup>

### 3.5.1 Datenerfassung/ Erhebungsmethoden

Ziel von Zuverlässigkeitstest ist es, von einer Stichprobe vom Umfang  $n$  auf die Grundgesamtheit zu schließen. Die Stichprobenelemente müssen dabei unabhängig voneinander sein. Eine andere Voraussetzung ist, dass die Stichprobe homogen ist, d.h. dass alle Stichprobenelemente demselben Wahrscheinlichkeitsmodell folgen.<sup>303</sup>

Ausgangspunkt für die Ermittlung des Ausfallverhaltens ist die Datenerhebung. Sie ist Kernbestandteil jeder empirischen Untersuchung. Bei der Planung von Lebensdauerversuchen kann zwischen versuchstechnisch-messtechnischer Planung und statistischer Planung unterschieden werden. Für versuchstechnisch-messtechnische Planungen ist eine genaue Definition der Randbedingungen und Grenzwerte sowie deren Einhaltung notwendig. Außerdem muss genau festgelegt sein, ab wann die Funktion des Bauteils nicht mehr erfüllt ist.<sup>304</sup> Bei der Planung von statistischen Prüfungen ist es notwendig, die Prüflosgröße festzulegen. Grundsätzlich kann zwischen zwei verschiedenen Teststrategien unterschieden werden:

- Vollständige Tests
- Unvollständige (zensierte) Test

Bei vollständigen Tests liegt der Zeitpunkt  $T$ , zu dem es zum Ausfall des Bauteils kommt, innerhalb der Testdauer  $t$ . Bei zensierten Tests fallen während der festgelegten Testdauer  $t$  nur maximal  $r \leq n$  Bauteile aus. Zensierung vom Typ I bedeutet, dass der Test zu einem festgelegten Zeitpunkt  $t^*$  beendet wird, während bei einer Zensierung vom Typ II der Test bei Erreichen einer vorgegebenen Anzahl von Ausfällen  $r^* < n$  abgebrochen wird.<sup>305</sup> In der Zuverlässigkeitstechnik

<sup>302</sup> Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.36.

<sup>303</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistik für Ausfalldaten. Berlin, Heidelberg 2016, S.77.

<sup>304</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.192 ff.

<sup>305</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistik für Ausfalldaten. Berlin, Heidelberg 2016, S.78.

sind Tests in der Regel zensiert. Ein Nachteil von zensierten Tests vom Typ II ist, dass die Testdauer vorher nicht bekannt und damit eine Zufallsgröße ist. Daher werden in der Regel zensierte Tests vom Typ I durchgeführt.<sup>306</sup>

### 3.5.2 Grundbegriffe und Definitionen

#### Ausfallwahrscheinlichkeit

Die Ausfallwahrscheinlichkeit

$$F(t) = P(T \leq t)$$

##### Formel 3-1: Ausfallwahrscheinlichkeit

beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Bauteil innerhalb eines Zeitintervalls  $[0; t]$  ausfällt. Sie ist eine monoton nicht fallende Funktion, die einen Wertebereich von  $[0, 1]$  aufweist.<sup>307</sup>

#### Überlebenswahrscheinlichkeit

Die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Systems – auch als Zuverlässigkeit bezeichnet – gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der im Zeitraum  $[0; t]$  kein Ausfall eintritt. Sie ist damit das Gegenteil zur Ausfallwahrscheinlichkeit und definiert als

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t)$$

##### Formel 3-2: Überlebenswahrscheinlichkeit

$R(t)$  ist eine nicht wachsende Funktion mit  $0 \leq R(t) \leq 1$ .<sup>308</sup>

#### Dichtefunktion

Die Dichtefunktion  $f(t)$  beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls zum Zeitpunkt  $t$  bezogen auf ein sehr kleines Zeitintervall  $dt$ . Sie ergibt sich als Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit<sup>309</sup>:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{dP(T \leq t)}{dt}$$

##### Formel 3-3: Dichtefunktion einer Verteilung

Damit kann die Ausfallwahrscheinlichkeit durch Integration der Dichtefunktion gewonnen werden:

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

##### Formel 3-4: Integration der Dichtefunktion

<sup>306</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.216.

<sup>307</sup> Vgl. Franz, Jürgen: Vorlesung über Zuverlässigkeit und Statistik bei reparierbaren Systemen. Dresdner Schriften zur mathematischen Statistik. Dresden 2016, S. 17.

<sup>308</sup> Vgl. Franz, Jürgen: Vorlesung über Zuverlässigkeit und Statistik bei reparierbaren Systemen. Dresdner Schriften zur mathematischen Statistik. Dresden 2016, S. 18.

<sup>309</sup> Vgl. Franz, Jürgen: Vorlesung über Zuverlässigkeit und Statistik bei reparierbaren Systemen. Dresdner Schriften zur mathematischen Statistik. Dresden 2016, S. 18.

## Ausfallrate

Die Ausfallrate – auch als Hazardrate bezeichnet – beschreibt in einem Zeitintervall  $dt$  das Verhältnis der ausgefallenen Einheiten zu den noch intakten Einheiten. Sie ist definiert als Quotient aus der Dichtefunktion und der Überlebenswahrscheinlichkeit:<sup>310</sup>

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

### Formel 3-5: Berechnung der Ausfallrate

Aus den oben genannten Formeln ist ersichtlich, dass alle Größen ineinander überführbar sind.

### 3.5.3 Lebensdauerverteilungen

Für Zuverlässigkeitsanalysen ist die mathematische Beschreibung des Ausfallverhaltens von großer Bedeutung. Hierfür gibt es verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Einige dieser Modelle sind für die Beschreibung von Lebensdauern besonders gut geeignet. Hierunter fallen bspw. die Gamma-, Exponential- und Weibullverteilung. Die Normalverteilung eignet sich für die Beschreibung von Lebensdauern nur in wenigen Fällen, da die meisten Ausfälle im Mittelwert auftreten müssen und dann symmetrisch zu diesem Mittelwert abfallen.<sup>311</sup> Die Exponentialverteilung wird häufig im Bereich der Elektrotechnik angewendet. Ihr Nachteil ist, dass sie eine konstante Ausfallrate beschreibt, d.h. dass zu einem Zeitpunkt immer ein gleich großer Prozentsatz der Elemente ausfällt. Aufgrund dieser konstanten Ausfallrate wird zu Beginn der Lebensdauer bereits von einer großen Ausfallhäufigkeit ausgegangen.<sup>312</sup> Daher ist sie für die Beschreibung der Lebensdauer von Bauteilen ungeeignet, da hier mit steigender Nutzungsdauer eine höhere Ausfallrate einhergeht (vgl. Abbildung 3-20). Die Weibullverteilung wird hauptsächlich im Maschinenbau verwendet und eignet sich zur Beschreibung unterschiedlichen Ausfallverhaltens. Sie kann eine große Anzahl an unterschiedlichen empirischen Daten beschreiben.<sup>313</sup> Da sie für Abnutzungsvorgänge die am meisten verwendete Verteilung ist und zumeist angenommen wird, dass Lebensdauern dieser Verteilung unterliegen, wird sie im Folgenden näher erläutert.<sup>314 315</sup>

Die Form der Verteilung wird durch den Formparameter  $b$  bestimmt, welcher ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten ist. Durch eine entsprechende Wahl des Formparameters können – im Gegensatz zu Exponentialverteilung – verschiedene Ausfallraten dargestellt werden. Für  $b < 1$  ergibt sich ähnlich wie bei einer Exponentialverteilung eine abnehmende Ausfallrate. Für  $b = 1$  ergibt sich eine konstante Ausfallrate und für  $b > 1$  eine zunehmende Ausfallrate mit der

<sup>310</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 22.

<sup>311</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 37.

<sup>312</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 37. S. 39-40.

<sup>313</sup> Vgl. Nelson, Wayne B.: Applied Life Data Analysis. Hoboken 2004, S. 36.

<sup>314</sup> Vgl. Reichelt, Claus: Rechnerische Ermittlung der Kenngrößen der Weibull-Verteilung. Band 56 der Reihe 1: Konstruktionstechnik Maschinenelemente. Düsseldorf 1978.

<sup>315</sup> Vgl. Deutsche Gesellschaft für Qualität: Das Lebensdauernetz: Leitfaden zur grafischen Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen der Weibull-Verteilung. Berlin 1995.



Ermüdungs- und Verschleißausfälle beschrieben werden können. Mit größer werdendem  $b$  verschiebt sich das Maximum der Dichtefunktion immer weiter nach rechts. Als zweiten Parameter besitzt die Weibullverteilung die charakteristische Lebensdauer  $T$ . Die Veränderung dieses Parameters hat eine Stauchung bzw. Streckung der Zeitachse zur Folge. Der charakteristischen Lebensdauer  $T$  ist eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 % zugeordnet.<sup>316</sup>

Die Weibullverteilung ist wie folgt definiert:<sup>317</sup>

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

**Formel 3-6: Dichtefunktion**

$$R(t) = \int_0^t f(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

**Formel 3-7: Überlebenswahrscheinlichkeit**

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

**Formel 3-8: Ausfallwahrscheinlichkeit**

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$$

**Formel 3-9: Ausfallrate**

$$E(t) = \frac{1}{T} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{b}\right)$$

**Formel 3-10: Erwartungswert**

$$Var(t) = \frac{1}{T^2} \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{b}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{b}\right) \right]$$

**Formel 3-11: Varianz**

Durch einen weiteren Parameter  $t_0$  kann sie zur dreiparametrischen Verteilung erweitert werden. Der Parameter  $t_0$  bezeichnet die ausfallfreie Zeit. Beispielsweise gibt es Bauteile, deren Abnutzungsprozess erst beginnt, sobald ein anderes Bauteil ausgefallen ist oder einen bestimmten Zustand erreicht hat. Da dieser Fall für den hier betrachteten Forschungsgegenstand allerdings nicht von Relevanz ist, soll auf eine weitere Ausführung der dreiparametrischen Weibullverteilung an dieser Stelle verzichtet werden. Hier sei auf die Ausführungen von BERTSCHE & LECHNER<sup>318</sup> sowie HÄRTLER<sup>319</sup> verwiesen.

<sup>316</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 41-46.

<sup>317</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.43.

<sup>318</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004.

<sup>319</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin 1983.

Die Weibullverteilung wurde von W. Weibull in den Jahren 1930 und 1950 eingeführt, um das Ausfallverhalten für verschiedene Ermüdungsversuche zu beschreiben. Für eine Wahrscheinlichkeit  $P(X \leq x) = F(x)$  definierte er folgende Funktion.<sup>320 321</sup>

$$F(x) = 1 - \exp[-\varphi(x)]$$

**Formel 3-12: Wahrscheinlichkeitsfunktion nach Weibull**

Für die Funktion  $\varphi(x)$  definierte Weibull die Anforderungen, dass sie monoton steigend sowie positiv ist und dass eine untere Grenze  $x_u$  existiert, vor der  $\varphi(x) = 0$  ist.

$$\varphi(x) = \left[ \left( \frac{x - x_u}{x_0} \right)^m \right]$$

**Formel 3-13: untere Grenze**

Durch Einsetzen von Formel 3-13 in Formel 3-12 ergibt sich die Weibullverteilung in dreiparametrischer Form:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}$$

**Formel 3-14: dreiparametrische Weibullverteilung**

Die Verteilung wurde von Weibull auf einer rein empirischen Grundlage entwickelt.<sup>322</sup> Eine wahrscheinlichkeitstheoretische Begründung für die Entwicklung der Weibullverteilung lieferten FREUDENTHAL<sup>323</sup> und GUMBEL<sup>324</sup> sowie GALAMBOS<sup>325</sup>, welche im Wesentlichen folgende Definition enthält:

*„Die Weibullverteilung entspricht einer asymptotischen Extremwertverteilung der kleinsten (ersten) Ranggröße einer Stichprobe vom Umfang n, falls n sehr groß wird ( $n \rightarrow \infty$ ).“<sup>326</sup>*

Wenn die Lebensdauer von n Elementen mit  $t_1, t_2, \dots, t_n$  bezeichnet wird, ist die Lebensdauer des gesamten Elements  $t_{Element} = \min(t_1, t_2, \dots, t_n)$ . Das Element versagt demnach durch den Ausfall des schwächsten Glieds. Daher entspricht die Ausfallzeit  $t_{Element}$  der kürzesten Ausfallzeit der „Stichprobe“ vom Umfang n. Diese minimale Ausfallzeit wird als erste Ranggröße der Stichprobe bezeichnet. Für eine andere ähnliche Komponente mit der gleichen Anzahl an

<sup>320</sup> Vgl. Juskowiak, Jochen: Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsanalysen. Dissertation. Institut für Maschinenelemente. Stuttgart 2017, S. 13.

<sup>321</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.54.

<sup>322</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 54.

<sup>323</sup> Vgl. Freudenthal A., Gumbel, Emil Julius.: Maximum Life in Fatigue. American Statistical Association Journal. New York, 1954, S. 575-597.

<sup>324</sup> Vgl. Gumbel, Emil Julius: Statistics of extremes. New York: Columbia University Press, 1958.

<sup>325</sup> Vgl. Galambos, János: The Asymptotic Theory of Extreme Order Statistic. New York 1978.

<sup>326</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.55.

Stichproben  $n$  wird die minimale Ranggröße leicht variieren. Dieser Ranggröße kann demnach eine Verteilung zugeordnet werden. Da die erste Ranggröße (bzw. gleichfalls die  $n$ -te Ranggröße) eine extreme Ranggröße ist, wird sie als Extremwert und ihre Verteilung als Extremwertverteilung (vgl. Kapitel 3.5.4) bezeichnet. Für den Grenzübergang  $n \rightarrow \infty$  ergibt sich daraus, dass die Lebensdauer des Bauteils weibullverteilt ist.<sup>327 328</sup>

Die Weibullverteilung ist eine gedächtnisbehaftete Verteilung, d.h. die Verteilung berücksichtigt den Einfluss des Alters auf die Zuverlässigkeit. Dieser Zusammenhang lässt sich an der Hazard rate erkennen, die zeitabhängig ist, welche je nach Wahl des Formparameters  $b$  über die Zeit konstant, steigend oder fallend sein kann. Für  $b = 1$  und somit die Exponentialverteilung ergibt sich eine konstante Ausfallrate. In Formel 3-9 zur Berechnung der Hazardrate ist zu erkennen, dass der Formparameter  $b$  als Exponent der Zeit eingeht. Je weiter also die Zeit fortgeschritten ist, desto größer wird der gesamte Term.<sup>329</sup>

Betrachtet man den Fall, dass es im Zeitraum  $[t, t + \Delta t]$  zu einem Ausfall kommt, muss die Voraussetzung erfüllt sein, dass es im Zeitraum  $[0, t]$  zu keinem Ausfall gekommen ist. Über die bedingte Wahrscheinlichkeit lässt sich dieser Zusammenhang folgendermaßen ausdrücken.<sup>330</sup>

$$P(0 < T \leq t + \Delta t \mid T > t)$$

Somit ist die Ausfallrate die bedingte Ausfallwahrscheinlichkeit eines Bauteils nach Erreichen des Zeitpunkts  $t$ , da gilt:

$$P(0 < T \leq t + \Delta t \mid T > t) = 1 - \frac{P(T > t + \Delta t)}{P(T > t)} = 1 - \frac{R(t + \Delta t)}{R(t)} = -\frac{R'(t)}{R(t)} \Delta t = \lambda(t) \Delta t$$

Ersetzt man das infinitesimale Zeitintervall  $dt$ , auf das sich die Wahrscheinlichkeitsdichte bezieht, durch das Intervall  $[t, t + \Delta t]$  mit  $\Delta t \rightarrow 0$ , bedeutet das, dass die Ausfallrate  $\lambda(t) \Delta t$  die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Objekt bis zum Zeitpunkt  $t$  funktioniert hat und im Zeitraum  $[t, t + \Delta t]$  ausfallen wird. Eine weitere Schreibweise für die Ausfallrate wäre demzufolge<sup>331</sup>

$$\lambda(t) = -\frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{d}{dt} \log R(t)$$

wobei  $\frac{d}{dt} R(t) = R'(t)$  ist.<sup>332</sup>

<sup>327</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.55-56.

<sup>328</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin 1983.

<sup>329</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin 1983. S. 24.

<sup>330</sup> Vgl. Jürgen Franz: Vorlesungen über Zuverlässigkeit und Statistik bei reparierbaren Systemen. Technische Universität Dresden. Dresden 2016, S. 19.

<sup>331</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Wahrscheinlichkeitsmodelle. In: Statistik für Ausfalldaten. Berlin; Heidelberg 2016, S.24.

<sup>332</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Wahrscheinlichkeitsmodelle. In: Statistik für Ausfalldaten. Berlin; Heidelberg 2016, S. 24

### 3.5.4 Extremwerttheorie

Die Extremwerttheorie entspricht dem zentralen Grenzwertsatz für den jeweils größten bzw. kleinsten Wert von Stichproben. Der zentrale Grenzwert besagt, dass der Mittelwert von u.i.v. Zufallsgrößen annähernd normalverteilt ist. Das Maximum von u.i.v. Zufallsvariablen konvergiert ebenfalls zu einer bestimmten Verteilung.<sup>333</sup>

Seien  $X_1, X_2, \dots, X_n$  u.i.v. und es gilt:

$$M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$$

**Formel 3-15: Maximum der Zufallsvariablen**

Das Verhalten der Maxima  $M_n$  wird durch die Dichtefunktion  $F(x)$  beschrieben. Da die Zufallsvariablen u.i.v. verteilt sind gilt:

$$P(M_n \leq x) = P(X_1 \leq x, \dots, X_n \leq x) = \prod_{i=1}^n P(X_i \leq x) = F^n(x)$$

**Formel 3-16: Dichtefunktion der Maxima**

Für den Fall  $n \rightarrow \infty$  degeneriert die Verteilung von  $M_n$  zu 0 oder 1.

Um diese Schwierigkeit zu beheben, wird das Maximum  $M_n$  durch zwei Konstanten  $a_n \in R, b_n > 0$  standardisiert:

$$\frac{M_n - a_n}{b_n} = M_n^*$$

**Formel 3-17: Standardisierung des Maximums**

Das Fisher-Tippett-Gnedenko- Theorem ist das Pendant zum zentralen Grenzwertsatz im Extremwertbereich und besagt, wenn es Folgen  $a_n \in R, b_n > 0$  gibt, dann gilt

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} P\left(\frac{M_n - a_n}{b_n} < z\right) = H(z)$$

**Formel 3-18: Fisher-Tippett-Gnedenko Theorem**

und  $H(z)$  gehört zu einer der drei Verteilungsfamilien<sup>334</sup>:

$$\begin{aligned} \text{Gumbel - Verteilung} : H_1(z) &= \exp(-e^{-z}), z \in R \\ \text{Frechet Verteilung} : H_2(z) &= \begin{cases} \exp(-z^{-\alpha}), & z > 0 \\ 0, & z \leq 0 \end{cases} \\ \text{Weibull - Verteilung} : H_3(z) &= \begin{cases} 1, & z > 0 \\ \exp(-(-z)^\alpha), & z \leq 0 \end{cases} \end{aligned}$$

<sup>333</sup> Vgl. zur Extremwerttheorie: Gumbel, Emil Julius: Statistics of extremes. New York: Columbia University Press, 1958.

<sup>334</sup> Vgl. Galambos, János: The Asymptotic Theory of Extreme Order Statistic. New York 1978.

### 3.5.5 Methoden zum Schätzen in parametrischen Modellen

Zuverlässigkeitsanalysen sollen es ermöglichen anhand von Stichproben Aussagen über die Grundgesamtheit machen zu können. Hierfür stehen wie oben beschrieben verschiedene Verteilungen mit unbekanntem Parameter zur Verfügung. Für die Bestimmung der spezifischen Parameter einer Verteilung gibt es verschiedene analytische Methoden. Dabei erhält man einen Schätzwert  $\hat{\theta}$  für den gesuchten Parameter  $\theta$ .  $\theta$  bezeichnet dabei einen Parametervektor, der  $k$  unbekannte Parameter enthält. Es gilt, je umfangreicher der Datenbestand ist, desto genauer können die Parameter berechnet werden. Ein allgemein anwendbares Verfahren und die am häufigsten verwendete Methode in der Lebensdaueranalyse ist nach BERTSCHE&LECHNER<sup>335</sup>, JUSKOWIAK<sup>336</sup> und HÄRTLER<sup>337</sup> die Maximum-Likelihood Methode. Auch THOMAN & BAIN & ANTLE zeigen, dass der Maximum Likelihood Schätzer für die Weibullverteilung besser ist als andere Methoden.<sup>338</sup> Weitere Methoden sind bspw. die Regressionsmethode (auch Methode der kleinsten Quadrate) und die Momentenmethode. Der Nachteil der Momentenmethode liegt darin, dass mit diesem Verfahren nur vollständige Stichproben (vgl. Kapitel 3.5.1) ausgewertet werden können. Im Bereich der Lebensdaueranalyse kommen vollständige Stichproben i.d.R. allerdings nicht vor. Die Regressionsanalyse kann im Gegensatz dazu auch zensierte Stichproben auswerten, allerdings nur vom Typ II. Die Hauptgründe in der Verwendung der Regressionsanalyse bestehen in ihrer einfachen Anwendung und Programmierung. Allerdings basieren die Regressions-Schätzer auf der falschen Annahme von unkorrelierten, gleichen Varianzresiduen der Residuen für Lebensdauerdaten.<sup>339</sup> Hier zeigt sich der größte Vorteil der Maximum-Likelihood Methode, die für jede Art von Daten angewendet werden kann. GENSCHEL & MEEKER führen einen umfangreichen Vergleich zwischen der Maximum-Likelihood Methode und der Median-Rang-Regression durch mit dem Ergebnis, dass ML-Schätzer in den meisten Fällen besser sind als Median-Rang-Regression Schätzer. Vor allem bei der Auswertung von zensierten Daten von Typ 1 zeigen sich die Vorteile vom ML-Schätzern, da hier auch die Merkmale der nicht ausgefallenen Prüflinge berücksichtigt werden.<sup>340</sup> Aus diesen Gründen wird im weiteren Verlauf nur die Maximum-Likelihood Methode näher betrachtet und erläutert. Für Ausführungen zu den anderen beiden Methoden sei an dieser Stelle auf die Arbeiten von BERTSCHE&LECHNER<sup>341</sup>, HÄRTLER<sup>342</sup>, und FETOUKI<sup>343</sup> verwiesen.

<sup>335</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 246 ff.

<sup>336</sup> Vgl. Juskowiak, Jochen: Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsanalysen. Dissertation. Institut für Maschinenelemente. Stuttgart 2017, S. 22 ff.

<sup>337</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin 1983.

<sup>338</sup> Vgl. Thoman, Darrel R; Bain, Lee J.; Antle, Charles E.: Interferences on the Parameter of the Weibull Distribution. In: Technometrics 11. 1969, S. 445-60.

<sup>339</sup> Vgl. Genschel, Ulrike; Meeker, William Q.: A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation. In: Quality Engineering. 2010. S. 240.

<sup>340</sup> Vgl. Genschel, Ulrike; Meeker, William Q.: A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation. In: Quality Engineering. 2010. S. 236-255.

<sup>341</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004.

<sup>342</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin 1983.

<sup>343</sup> Vgl. Fetouki, Hamid: Robuste Schätzung der Parameter der Weibullverteilung. Diplomarbeit. Universität Kassel, Institut für Mathematik. Kassel 2011.

Der von RONALD AYLNER FISHER eingeführten Maximum-Likelihood Methode liegt die Idee zugrunde, die Parameter einer Verteilung so zu bestimmen, dass die Stichprobe mit den Daten  $x \in X$  mit größtmöglicher Wahrscheinlichkeit der Verteilung entspricht. Anders ausgedrückt „wird die wahrscheinlichste Parameterkombination für einen Verteilungstyp gesucht, welche die gegebenen Daten realisiert hat und folglich am besten beschreibt“.<sup>344</sup>

Für eine Stichprobe, welche  $n$  unabhängige Ausfallzeiten  $t_1, t_2, \dots, t_n$  umfasst, existiert eine Dichtefunktion mit  $k$  unbekanntem Parameter, die zu einem Parametervektor  $\Theta$  zusammengefasst werden können. Die Likelihood-Funktion  $L$  für einen Stichprobenumfang  $n$  ist definiert als

$$L(t_1, \dots, t_i, \dots, t_n; \theta_1, \dots, \theta_l, \dots, \theta_k) = L = \prod_{i=1}^n f(t_i; \theta_1, \dots, \theta_l, \dots, \theta_k)$$

**Formel 3-19: Likelihood-Funktion L**

Der Ausdruck macht deutlich, dass die Likelihood-Funktion „als Funktion der Parameter bei gegebenen Daten zu verstehen ist und nicht als Funktion der Daten bei gegebenen Parametern“.<sup>345</sup>

Durch Logarithmieren der Funktion ergibt sich:

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k)$$

**Formel 3-20: Logarithmierte Likelihood-Funktion**

Durch Maximierung von Formel 3-20 ergeben sich die Maximum Likelihood Schätzer (MLE)  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_k$  aus den Lösungen der  $k$  Gleichungen:

$$\frac{\partial(\ln L)}{\partial \theta_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, k$$

**Formel 3-21: Maximierung der Maximum Likelihood-Funktion**

Für die zweiparametrische Weibullverteilung ist die Likelihood-Funktion eine streng konkave Funktion, weshalb immer das globale Maximum gefunden werden kann.<sup>346</sup>

Die oben aufgeführten Formeln gelten nur für vollständige Datensätze. Wie beschrieben, liegt der Vorteil der Maximum Likelihood Methode darin, dass sie sowohl für die Auswertung von zensierten Stichproben vom Typ I als auch vom Typ II angewendet werden kann. In beiden Fällen besteht die Stichprobe aus den gesammelten Beobachtungen  $x_1, x_2, \dots, x_n$  sowie der Information dass  $(n - r)$  Elemente innerhalb der Testdauer nicht ausgefallen sind. Diese Elemente müssen mit ihren Betriebsdauern mitberücksichtigt werden. Die Likelihood-Funktion kann für zensierte Datensätze um diese Information erweitert werden und ergibt sich zu

<sup>344</sup> Juskowiak, Jochen: Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsanalysen. Dissertation. Institut für Maschinenelemente. Stuttgart 2017. S. 22.

<sup>345</sup> Vgl. Juskowiak, Jochen: Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsanalysen. Dissertation. Institut für Maschinenelemente. Stuttgart 2017. S. 23.

<sup>346</sup> Vgl. Rinne, Horst: The Weibull distribution: A handbook. Chapman & Hall/ CRC, New York, 2008.

$$L = \frac{n!}{(n-r)!} \left\{ \prod_{i=1}^r f(t_i) \right\} S(t_T)^{n-r}$$

**Formel 3-22: Maximum-Kikelihood-Funktion für zensierte Stichproblem**

wobei für zensierte Stichproben vom Typ I die Endzeit  $t_T = t_0$  und für Typ II  $t_T = t_r$  ist.<sup>347 348</sup> Der Term  $S(t_T)^{n-r}$  beschreibt dabei die Zuverlässigkeit der nicht ausgefallenen Elemente. Durch den Faktor  $\frac{n!}{(n-r)!}$  wird die Anzahl der möglichen Variationen der  $n$  Elemente zu je  $(n-r)$  ausgefallenen Elementen berücksichtigt.<sup>349</sup>

### 3.5.6 Konfidenzintervall

Die berechneten Parameter einer Stichprobe werden nicht exakt den Parametern der Grundgesamtheit entsprechen. Um mit dem berechneten Parameter den „wahren“ Parameter mit möglichst großer Wahrscheinlichkeit zu treffen, werden Konfidenzintervalle konstruiert. Dieses ist ein Intervall, in dem der wahre Parameter mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt und dient als Qualitätsmerkmal für den Schätzer, in dem es dessen Varianz verdeutlicht.

Ein häufiger Wert, für den ein Konfidenzintervall angegeben wird, ist der statistische Mittelwert  $\bar{x}$ . Mittelwerte einer hinreichend großen Datenmenge ( $n \geq 30$ ) verteilen sich normal um den Mittelwert der Grundgesamtheit, unabhängig von der Verteilung der Werte der Grundgesamtheit. Bei der Streuung von Stichprobenwerten wird die Standardabweichung des Stichprobenmittelwertes als Standardfehler des Mittelwertes bezeichnet. Die Genauigkeit der Schätzung ist abhängig von der Streuung der Variablenwerte. Je größer der Standardfehler ist, desto unsicherer ist die Schätzung des Mittelwertes.<sup>350</sup>

Der Standardfehler lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{s^2}{n}}$$

**Formel 3-23: Standardfehlers<sup>351</sup>**

Mit Hilfe des Standardfehlers und einer gewählten Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha$  lässt sich das Konfidenzintervall berechnen. In der Regel erfolgt die Konstruktion eines symmetrischen Konfidenzintervalls:

<sup>347</sup> Vgl. Lawless, Jerald F.: Statistical Models and Methods for Lifetime Data. Second Edition. 2003. S.52-56.

<sup>348</sup> Vgl. Cohen, Clifford: Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based on Complete and on Censored Samples. In: Technometrics. Nov. 1965. S. 581.

<sup>349</sup> Vgl. Härtler, Gisela: Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse. Berlin 1983, S. 71.

<sup>350</sup> Vgl. Kuckartz, Udo; Rädiker, Stefan; Ebert, Thomas; Schehl, Julia: Statistik – Eine verständliche Einführung. 1. Auflage. Wiesbaden 2010, S.132-133.

<sup>351</sup> Kuckartz, Udo; Rädiker, Stefan; Ebert, Thomas; Schehl, Julia: Statistik – Eine verständliche Einführung. 1. Auflage. Wiesbaden 2010, S.133.

$$\bar{x} \pm z_{1-\alpha/2} \cdot \sigma_x$$

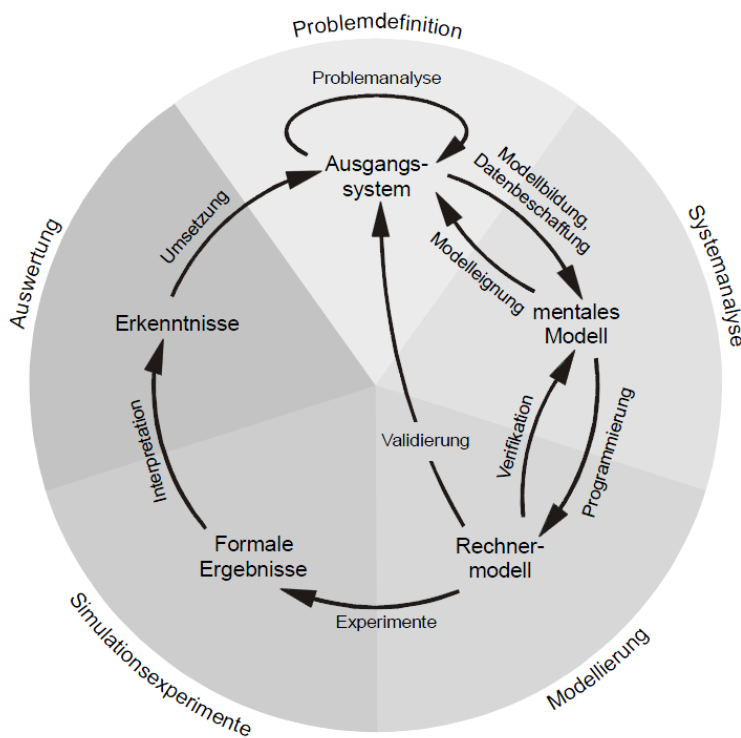
**Formel 3-24: Berechnung des Konfidenzintervalls**

$z_{1-\alpha/2}$  stellt das  $(1 - \frac{\alpha}{2})$  Quantil der Standardnormalverteilung dar. Häufig wird ein 95 % Konfidenzintervall bestimmt, so dass  $\alpha = 0,05$  ist.<sup>352</sup>

### 3.6 Grundlagen der Modellbildung und Simulation

In diesem Kapitel werden wichtige Begriffe definiert sowie die Grundlagen für die Modellbildung und Simulation erläutert.

In Abbildung 3-21 ist die Vorgehensweise für die Erstellung einer Simulation dargestellt. Anhand der Abbildung soll im Folgenden der Ablauf vom bestehenden Problem bis zur Analyse der Simulation dargestellt werden. In einem ersten Schritt werden dazu wesentliche Begriffe definiert. Anschließend werden die einzelnen Schritte erläutert.



**Abbildung 3-21: Übersicht von Simulation, System, Modellbildung, Auswertung<sup>353</sup>**

#### 3.6.1 Grundlagen der Simulation

Wie in Abbildung 3-21 ersichtlich ist zu Beginn jeder Simulation ein reales Ausgangssystem verknüpft mit einer Problemstellung vorhanden, welche es zu lösen gilt. Simulation kann allgemein als „vereinfachtes Nachbilden einer komplexen Situation oder eines komplexen

<sup>352</sup> Vgl. Christiansen, Hannes: Konfidenzintervalle für kombinierte Wählermodelle. TU Kaiserslautern. Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik. S. 8.

<sup>353</sup> Kudlich, Thomas: Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl Fördertechnik, Materialfluss, Logistik. München 2000, S.29.



Systems [...]“ verstanden werden. Simulationen erlauben es, an einem Modell das Verhalten einer Wirklichkeit festzustellen. Mit ihnen können hochkomplexe Systeme beschrieben und untersucht werden, die sich einer analytischen Formulierung entziehen. Techniken der angewandten Mathematik können bei einfach gehaltenen Systemen, welche von der Realität stark abstrahiert sind, zufriedenstellende Ergebnisse liefern. Sind die Zusammenhänge eines Modells komplex und sollen möglichst realistisch abgebildet werden, können diese nicht mehr mit mathematischen Methoden gelöst werden. Die VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1 definiert Simulation als „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt“.<sup>354</sup> So können mittels Simulationen zukünftige Entwicklungen prognostiziert werden.<sup>355</sup>

### 3.6.2 Systeme

Ein System ist nach DIN IEC 60050-351 definiert als eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet werden“<sup>356</sup>. Ein System wird durch seine Systemgrenzen gegenüber der Systemumgebung abgegrenzt. Alles, was innerhalb dieser Systemgrenzen liegt, gehört zum Simulationsmodell, alles was außerhalb liegt, gehört zu der Systemumgebung. Das System wird von Messgrößen angesteuert (Eingangsgrößen), welche von außen auf das System wirken. Im System selbst befinden sich Systemelemente, welche zueinander in Beziehung stehen sowie Zustandsgrößen, welche in ihrer Gesamtheit den Systemzustand beschreiben. Die Struktur bestimmt daraus sämtliche interessierenden Informationen als Ausgangsgrößen.<sup>357</sup> Die einzelnen Systemkomponenten sind in Abbildung 3-22 dargestellt.

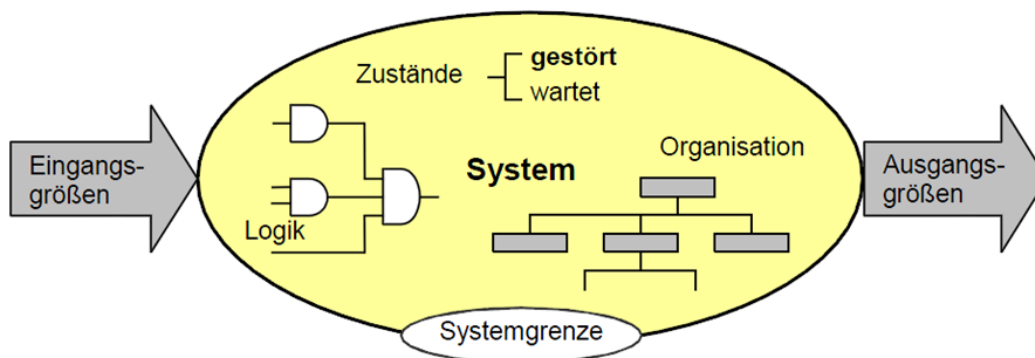


Abbildung 3-22: Systemkomponenten<sup>358</sup>

Die Struktur eines Systems bildet die Beziehungen zwischen den Elementen des Systems ab.<sup>359</sup> Ein komplexes Modell besteht in der Regel aus mehreren Submodellen, deren Beziehungen und

<sup>354</sup> Verein Deutscher Ingenieure: VDI Richtlinie 3633 Blatt 1. Düsseldorf 2004, S. 3.

<sup>355</sup> Vgl. Kolonko, Michael: Stochastische Simulation. Wiesbaden 2008, S. 1.

<sup>356</sup> Deutsches Institut für Normung: DIN IEC 60050-351. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch- Teil 351: Leittechnik. Berlin 2014, S.21.

<sup>357</sup> Vgl. Rossmann, Axel: Strukturbildung und Simulation technischer Systeme. Band 1. Hamburg 2019. S. 45.

<sup>358</sup> Kudlich, Thomas: Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl Fördertechnik Materialfluss Logistik. München 2000, S. 10

<sup>359</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung: DIN IEC 60050-351. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch- Teil 351: Leittechnik. Berlin 2014, S.22.

Wechselwirkungen untereinander dargestellt werden (vgl. Abbildung 3-23). Strukturen stellen sämtliche Funktionen eines Systems als Verknüpfung aller Ursachen und Wirkungen in graphischer Form dar.<sup>360</sup> Das Ziel einer Simulation ist es daher, Systeme mit ihren Zusammenhängen abzubilden, um daraus Erkenntnisse über die Wirklichkeit zu erlangen. Dabei sollen mit dem Simulationsmodell Experimente durchgeführt werden.

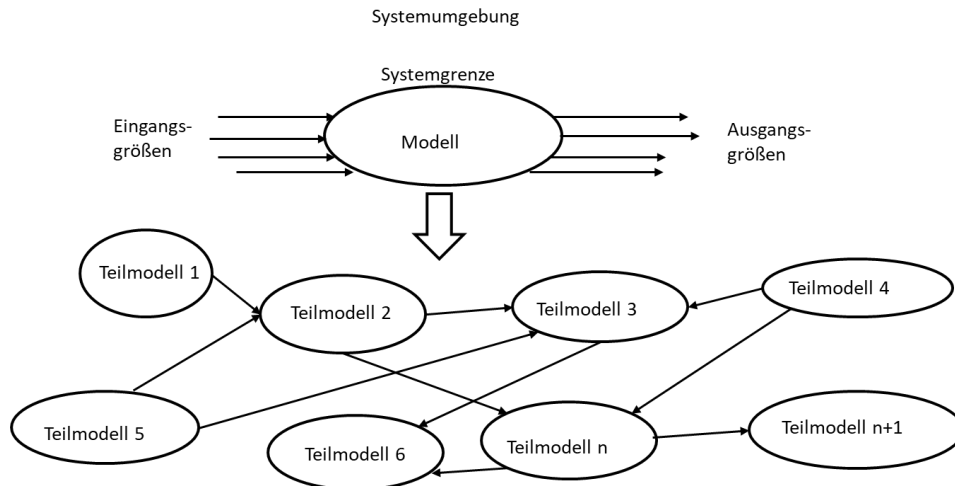


Abbildung 3-23: beispielhafte Modellstruktur<sup>361</sup>

Aus einem realen System, kann ein Modell entwickelt werden. Das entstandene Modell muss durch eine Analyse und Auswertung validiert werden, damit die späteren Ergebnisse auch Aussagekraft besitzen.

Die plötzliche Änderung des Zustandes eines Systems wird als Ereignis bezeichnet. Dabei ändert sich häufig die Menge der Objekte im System. Im Fall der Simulation eines Lebenszyklus eines Bauwerks stellt der Austausch eines Bauteils ein Ereignis dar. Dieser Vorgang ist mit einem Verlassen eines Objekts aus dem System gleichzusetzen. Ein Ereignis tritt grundsätzlich zu einem konkreten Zeitpunkt ein und wird durch einen Zeitstempel definiert.<sup>362</sup>

Eine Aktivität (z.B. die Nutzung/Nutzungsdauer eines Bauteils oder die Dauer einer Instandsetzungsmaßnahme) ist ein Vorgang zwischen einem Startereignis und Endereignis und dauert eine gewisse Zeit an. Eine Aktivität ändert den Zustand eines Systems nicht, man kann ihr aber eine bestimmte Zeit geben. Diese Zeit bildet die sog. Realzeit der Simulation ab.<sup>363</sup>

Bildet eine objektbezogene Betrachtung auf Teilprozesse die Grundlage der Simulation, so spricht man von einer prozessorientierten Betrachtung. Hierfür muss die Abfolge von Ereignissen, welche Zustandsänderungen darstellen, während des Lebenszyklus als Prozess definiert werden. Die Aktivitäten zwischen den Ereignissen geben dem Prozess den entsprechenden Charakter. Ausgenommen vom ersten und letzten Ereignis zeichnet ein Ereignis immer das Ende einer alten und den Anfang einer neuen Aktivität aus.<sup>364</sup>

<sup>360</sup> Vgl. Rossmann, Axel: Strukturbildung und Simulation technischer Systeme. Band 1. Hamburg 2019. S. VIII.

<sup>361</sup> Glöckler, Michael: Simulation mechatronischer Systeme. Wiesbaden 2018, S. 10.

<sup>362</sup> Vgl. Hedtstück, Ulrich: Simulation diskreter Prozesse. Berlin 2013, S. 10.

<sup>363</sup> Vgl. Hedtstück, Ulrich: Simulation diskreter Prozesse. Berlin 2013, S. 11 f.

<sup>364</sup> Vgl. Hedtstück, Ulrich: Simulation diskreter Prozesse. Berlin 2013, S. 16.

### 3.6.3 Arten von Simulationen

Simulationen können als statische oder dynamische Systeme modelliert werden. Dynamische Systeme sind durch Zustandsänderungen über die Zeit gekennzeichnet, während der Zeitfortschritt bei statischen Systemen keine Rolle spielt. Dynamische Systeme bestehen aus einer Ereignismenge  $E$ , einer Zustandsmenge  $Z$  sowie einer Zeitmenge  $T$ . Die Zustandsmenge  $Z$  enthält alle möglichen Zustände des Systems. Der Zustand  $z$  eines Systems oder eines Systemelements verändert sich bei Eintreten eines Ereignisses  $e \in E$ .<sup>365</sup>

Weiterhin kann zwischen zwei verschiedenen Methoden ein System zu modellieren unterschieden werden, - die ereignisorientierte Methode und die kontinuierliche Methode. Bei der kontinuierlichen Simulation ist die Zeitspanne am Anfang der Simulation festgelegt. Die Werte verändern sich entsprechend des Zeitfortschritts. Im Gegensatz dazu verändert sich der Systemzustand bei einer ereignisorientierten Simulation, wenn bestimmte Ereignisse auftreten. Der bloße Zeitfortschritt hat keinen Einfluss auf den Systemzustand. Eine weitere Methode der Simulation ist die sogenannte „discrete rate“ Simulation, welche Aspekte der kontinuierlichen sowie der ereignisorientierten Simulation verbindet. Wie die kontinuierliche Methode simuliert die discrete rate Methode den Fortschritt der Zeit. Sie berücksichtigt aber auch Veränderungen des Systems beim Auftreten von Ereignissen.

### 3.7 Zwischenfazit und Forschungsziel

Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur sind während ihres Lebenszyklus äußeren Einflüssen wie Verkehrsbelastung, Regen, Frost oder Tausalz ausgesetzt. Diese Faktoren beeinflussen die Verminderung des Abnutzungsvorrates und setzen die Gebrauchstauglichkeit herab. Die einzelnen Bauteile der Bauwerke sind regelmäßig zu erneuern, um die Lebensdauer des gesamten Bauwerks zu erreichen und den Funktionsbetrieb aufrecht zu erhalten. Aus diesen Maßnahmen ergeben sich die zukünftigen Investitionskosten, welche für eine langfristige Budgetplanung zu bestimmen sind.

Die in Kapitel 3 vorgestellten Ansätze zur Bestimmung der zukünftigen Investitionskosten beziehen sich auf eine zustandsorientierte Instandhaltung. Um die notwendigen Haushaltsmittel aber gezielt einzusetzen, bedarf es einer langfristigen Planung der Investitionen, die idealerweise bereits zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung stattfindet. Im Hinblick auf die Altersstruktur der Bauwerke ist eine langfristige Investitionsplanung auch für Bauwerke im Bestand von Bedeutung. Die vorhandenen Forschungsarbeiten zur Bestimmung der Kosten weisen unterschiedliche Detaillierungsgrade im Bereich der Kostenkennwerte auf. Teilweise werden die Instandsetzungskosten prozentual in Abhängigkeit der Herstellungskosten berechnet. Für eine wirtschaftliche Steuerung zukünftig anfallender Kosten und somit eine fundierte Planung der Finanzmittel sind solche Angaben nicht ausreichend. Hierfür bedarf es fundierter Kenntnisse über die Höhe und den Zeitpunkt der Kosten. Diese Kenntnisse liegen idealerweise bereits in den frühen Projektphasen vor. Ein weiteres Verfahren, die Investitionskosten zu ermitteln, ist die Berechnung mit Kostenkennwerten, die in Abhängigkeit der Bauwerksabmessungen angegeben werden (vgl. Modell nach ROSE<sup>366</sup> und Modell des Bund/ Länder- Fachausschusses Brücken- und

---

<sup>365</sup> Vgl. Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid: Simulation in Produktion und Logistik. Berlin 2017, S. 12-13.

<sup>366</sup> Vgl. Rose, Karl: Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken. Dissertation, Düsseldorf 1989.

Ingenieurbau<sup>367</sup>). Diese Kostenkennwerte berücksichtigen aber nicht die spezifischen Objekteigenschaften, was zu Ungenauigkeiten in der Kostenermittlung führt. Das Modell des Bund/ Länder- Fachausschusses Brücken- und Ingenieurbau berechnet die zukünftigen Investitionskosten durch festgesetzte Instandsetzungszeitpunkte der einzelnen Bauteile. Wie in Kapitel 3.3.2.2 gezeigt, wird die Lebensdauer von Bauteilen durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Es lässt sich vermuten, dass die deutlichen Unterschiede der Lebensdauerangaben in der Literatur auf unterschiedliche Einflüsse zurückzuführen sind.

Die vorgestellten Modelle zur Lebensdauerberechnung in Kapitel 3.3.2.3, welche auf der DIN ISO 15686 beruhen, gehen immer von einer Referenzlebensdauer eines Bauteils aus, welche durch Faktoren, die die Umgebungsbedingungen berücksichtigen, auf- oder abgemindert wird. Für derartige Verfahren muss sichergestellt werden, dass bereits die Ermittlung der Referenzlebensdauer weder durch negative noch durch positive Einflussfaktoren verfälscht wird. Um die Referenzlebensdauern an die jeweiligen Umgebungsbedingungen anzupassen, sind genaue Kenntnisse über die quantitativen Auswirkungen der Einflüsse auf die Lebensdauern notwendig. Diese Kenntnisse liegen in der Regel aber nicht vor, so dass die Wahl der Werte oft subjektiven Einflüssen unterliegt. Der genaue Einfluss der Faktoren auf den Abnutzungsverlauf kann nur über umfangreiche Versuche untersucht werden. Daten inwiefern sich bspw. eine Erhöhung der Temperatur oder der Nutzungsintensität auf den Abnutzungsverlauf auswirken, sind in der Literatur nicht vorhanden.

Eine Berechnung der zukünftigen Investitionskosten in Abhängigkeit zu den Herstellungskosten ist nicht zielführend. Die Herstellungskosten beinhalten verschiedene Kostenarten (Lohn, Stoffe, Geräte, Schalung/ Rüstung) sowie die Projektgemeinkosten und sind abhängig vom Bauverfahren. Am Ende dem Alterungsprozess ausgesetzt ist aber lediglich das Material bzw. der Baustoff (z.B. Asphalt, Beton). Werden die Instandsetzungskosten abhängig von den Herstellungskosten berechnet, fließen neben der Kostenart „Stoffe“ auch die weiteren Kostenarten mit in die Instandsetzungskosten ein. Für die Instandsetzung eines Bauteils ist auch das Bauverfahren uninteressant und darf daher nicht die Instandsetzungskosten beeinflussen, da die Instandsetzungen unabhängig vom Bauverfahren vorgenommen werden. Durch prozentuale Aufschläge steigen die berechneten Instandsetzungskosten aber bei höheren Herstellungskosten. Beispielsweise hat ein Tunnel, welcher mit einer Tunnelvortriebsmaschine aufgefahren wurde, vermutlich höhere Herstellungskosten als Tunnel, welche in offener Bauweise hergestellt wurden. Die Instandsetzungskosten werden sich deswegen aber nicht unterscheiden.

Die Herstellungskosten können auch durch die Auswahl eines höheren Standards beeinflusst werden und dementsprechend ansteigen. Dieser höhere Standard hat aber ggf. eine höhere Lebensdauer. Damit muss das Bauteil seltener erneuert werden, was zu geringeren Instandsetzungskosten führt. Dies würde aber bei einer prozentualen Berechnung in Abhängigkeit der Herstellungskosten unberücksichtigt bleiben. In dem Fall würden sich die Instandsetzungskosten durch die höheren Herstellungskosten sogar noch erhöhen. Hinzu kommen durch weniger Instandsetzungen auch weniger Störungen des Verkehrsablaufes. Dadurch kann der volkswirtschaftliche Schaden gesenkt werden. Als Beispiel können Beton und

---

<sup>367</sup> Vgl. Landschaftsverband Rheinland, Straßenbauverwaltung, Referat Brücken- und Tunnelbau: Finanzbedarf für die Unterhaltung und Erneuerung der Bauwerke. Köln, Okt. 1984.

Asphaltfahrbahnen genannt werden. Betonfahrbahnen sind in der Herstellung teurer als Asphaltfahrbahnen verursachen aber aufgrund ihrer besseren Dauerhaftigkeit über den Lebenszyklus weniger Instandsetzungskosten.<sup>368</sup>

Die Angaben der Lebensdauern aus der Literatur berücksichtigen keine materiellen Einflüsse wie die Nutzungsintensität oder außenräumlichen Bedingungen und basieren auf Einschätzungen unterschiedlicher Experten. Aus diesem Grund wird der Rückschluss gezogen, dass die vorgestellten Lebensdauerangaben nur als Orientierung dienen. Aus dem Status Quo zur Bestimmung der Lebensdauern im Bauwesen unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren geht hervor, dass die vorgestellten Methoden auf der Faktorenmethoden nach DIN ISO 15686 basieren.

Materielle Einflussfaktoren auf die technische Lebensdauer werden in den vorgestellten Methoden aus Kapitel 3.3.2.3 durch subjektiv gewählte Faktoren berücksichtigt. Die Wahl der Referenzlebensdauer, die für die Anwendung der Faktormethode maßgebend ist, unterliegt ebenfalls subjektiven Einflüssen. Alle Methoden basieren grundsätzlich darauf, dass die Einflusswerte abgeschätzt werden. Es wird die Schlussfolgerung gezogen, dass es nicht wissenschaftlich und sinnvoll ist, den Einfluss eines materiellen Einflussfaktors wie z.B. die Nutzungsintensität auf die technische Lebensdauer von Beginn an auf einen unbegründet gewählten Wert zu begrenzen. Aus dem Status Quo wird die Schlussfolgerung gezogen, dass es notwendig ist, die Einflussfaktoren eines Bauteils zu ermitteln, bevor man die Auswirkungen auf die technische Lebensdauer quantifiziert.

Aus den oben genannten Problemstellungen ergibt sich das Forschungsziel dieser Arbeit. Im Folgenden wird eine Methodik entwickelt, mit der es möglich ist, die zukünftigen Investitionskosten in frühen Projektphasen für Neubauten sowie für Bauwerke im Bestand für die Verkehrsinfrastruktur zu prognostizieren. Hierfür wird ein Verfahren für die Genese von Kostenkennwerten und Lebensdauern entwickelt. Die Lebensdauern können über den Verlauf des Abnutzungsvorrates beschrieben werden. Da die Instandsetzungskosten nicht durch die Lebensdauer eines gesamten Objekts, sondern durch dessen einzelne Bauteile beeinflusst werden, ist eine Gliederung des Bauwerks in die einzelnen Bauteile, welche für die Instandsetzung zu berücksichtigen sind, notwendig. Für die Instandsetzung der Bauwerke stehen verschiedene Strategien zur Verfügung. Jedes Bauteil unterliegt einer eigenen Strategie, so dass sich für das Gesamtobjekt eine Mischstrategie ergibt. Dies hat zum Ziel eine möglichst hohe Verfügbarkeit unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten. Eine aktive Instandhaltung für das Gesamtobjekt stellt unter dem Aspekt der Verfügbarkeit die beste Strategie dar, ist aber auch mit entsprechend hohen Kosten verbunden. Den Bauteilen werden verschiedene Strategien sowie Lebensdauern und Kostenkennwerte zugeordnet, um die Kosten zu vergleichen, die mit verschiedenen Strategien und somit mit einer höheren Verfügbarkeit einhergehen.

---

<sup>368</sup> Vgl. Großmann, Andreas; Pauli, Lena: Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Sonderflächen in Betonbauweise im Life Cycle. Hochschule Konstanz, University of Applied Sciences. Internetquelle.

## 4 Methodik zur Entwicklung eines Modells

Ein Objekt  $O$  wird in seine einzelnen Bauteile  $BT_i$  gegliedert, von denen jedes eine technische Lebensdauer  $LD$  besitzt. Nach Erreichen dieser Lebensdauer ist das Bauteil zu ersetzen. Durch diese Maßnahmen entstehen die zukünftigen Investitionskosten, die sich aus der Montage, den Kosten des Bauteils sowie dazugehörigen Maßnahmen ergeben. Die einzelnen Bauteile eines Objekts  $O$  stellen die kostenverursachenden Bauteile bei der Betrachtung der Herstellungskosten sowie zukünftigen Investitionskosten dar. Folglich muss eine allgemeine Struktur eines Bauwerks mit seinen einzelnen Bauteilen  $BT_i$  hergeleitet und die Kosten dieser quantifiziert werden. Im Modell wird ein Objekt  $O$  mit seinen einzelnen Bauteilen  $BT_i$  definiert, dessen Herstellungskosten und zukünftige Investitionskosten berechnet werden sollen. Das Objekt kann eine Brücke, ein Tunnel oder ein Verkehrsweg als Streckenabschnitt sein. Jedes dieser Objekte besitzt spezifische Objekteigenschaften wie bspw. Länge und Querschnitt.

Die zukünftigen Investitionskosten setzen sich nach der Definition in Kapitel 2.3 aus den Kosten für Ersatzinstandsetzung, Verbesserung, Modernisierung und Revitalisierung zusammen. Die DIN 31051 unterteilt wie in Kapitel 3.1 gezeigt, die Maßnahmen der Instandhaltung in Wartung, Inspektion, Instandsetzung sowie Verbesserung.

Für das Modell wird eine Abgrenzung dieser unterschiedlichen Maßnahmen der Instandsetzung vorgenommen. Bei Maßnahmen der Instandsetzung erfolgt ein identischer Austausch des betrachteten Bauteils, während Maßnahmen der Verbesserung und Modernisierung durch einen nicht identischen Austausch einer Einheit gekennzeichnet sind. Bei Maßnahmen der Wartung und Inspektion findet kein Austausch von Bauteilen statt. Hier wird lediglich versucht, den Abnutzungsprozess zu beeinflussen. Da diese Maßnahmen zu keiner Veränderung des Wertes einer Betrachtungseinheit führen, sondern zur Erhaltung des Soll-Zustandes dienen, fallen diese Kosten unter die Betriebskosten und nicht unter die zukünftigen Investitionskosten, die im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden.

Das entwickelte Modell soll die Herstellungskosten sowie die zukünftigen Investitionskosten bestimmen. Unter den zukünftigen Investitionskosten wird im Folgenden die Berechnung der Kosten für die Instandsetzung nach der Definition in Kapitel 3.1.1 verstanden.

Erweiterungen bspw. aufgrund von erhöhtem Verkehrsaufkommen sowie Ersatzneubauten mit Abbruch der Tragstruktur sind nicht Gegenstand dieses Modells. Für Bauteile der Tragstruktur wie bspw. der Widerlager/ Pfeiler und die Gründung einer Brücke werden die Herstellungskosten berechnet. Ein Austausch bzw. Abbruch erfolgt erst am Ende des Lebenszyklus. Diese Bauteile werden für die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten nicht angesetzt. Ihnen wird dementsprechend eine unendliche Lebensdauer zugeordnet.<sup>369</sup> Dafür wird im Rahmen des Modells ein endlicher Planungshorizont festgelegt.

---

<sup>369</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S.80.

Am Ende ihrer technischen Lebensdauer müssen Bauteile ausgetauscht werden, um die Funktionsfähigkeit des Objekts und somit den volkswirtschaftlichen Nutzen aufrecht zu erhalten. Je kürzer die technische Lebensdauer einer Betrachtungseinheit, desto öfter muss diese während der Gesamtnutzungsdauer des Objekts ersetzt werden. Die Häufigkeit der Maßnahmen innerhalb eines bestimmten Zeitraumes kann über die Austauschrate  $\alpha$  beschrieben werden:

$$\alpha = \frac{T}{LD_{BT}}$$

**Formel 4-1: Berechnung der Austauschrate**

mit  $LD_{BT}$  = technische Lebensdauer des Bauteils  
 $T$  = betrachteter Zeitraum, z.B. Gesamtnutzungsdauer GND

Neben der Austauschrate  $\alpha$  beeinflussen weitere Variablen die Höhe der zukünftigen Investitionskosten. Jedes Objekt besitzt verschiedene Objekteigenschaften  $OE$ , welche sich aus dem Funktionsbetrieb ergeben und die Konzeption, Ausstattung und Dimensionierung des Objekts mit den einzelnen Bauteilen bestimmen (Art und Menge). Da sie das Kostenniveau der Instandsetzung maßgeblich beeinflussen, sind die Objekteigenschaften für jedes Objekt zu erfassen und dokumentieren.

$$[HK + IK_{z,o}] = f(K; A; D; \alpha)$$

**Formel 4-2: zukünftige Investitionskosten als Funktion von Konzeption, Ausstattung, Dimensionierung und Lebensdauer**

Für die Bestimmung der Objekteigenschaften liegen Daten verschiedener Objekte aus Deutschland in Form von Leistungsverzeichnissen mit den dazugehörigen Objekteigenschaften vor. Diese Daten enthalten sowohl die Art der Ausstattung als auch die vorliegende Menge. Mit Hilfe dieser Daten können die Objekteigenschaften  $OE$  induktiv hergeleitet werden.

Die einzelnen Bauteile unterliegen unterschiedlichen Einflussfaktoren (EF), welche die Lebensdauer beeinflussen. Somit ergibt sich die Lebensdauer eines Bauteils als Funktion der verschiedenen Einflussfaktoren:

$$LD_{BT} = f(EF_{BT})$$

**Formel 4-3: Lebensdauer eines Bauteils als Funktion der Einflussfaktoren**

In Kapitel 3.1.2 wurden verschiedene Strategien der Instandhaltung aufgezeigt. Diese Strategien beeinflussen den Zeitpunkt der Instandsetzung eines Bauteils. Bei einer vorausbestimmten Instandhaltung wird das Bauteil i.d.R. früher ausgetauscht als bei der aufgeschobenen Instandhaltung, um eine höhere Verfügbarkeit zu gewährleisten. Die Instandhaltungsstrategie eines Bauteils hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Lebensdauer. Dabei kann für jedes Bauteil eine eigene Instandhaltungsstrategie angewendet werden.

$$LD_{BT} = f(IS_{BT})$$

**Formel 4-4: Lebensdauer als Funktion der Instandhaltungsstrategie**

Die technische Lebensdauer eines Bauteils beeinflusst die Höhe der Zahlungen während der Gesamtnutzungsdauer. Damit kann die Lebensdauer  $LD$  - und somit nach Formel 4-3 die Einflussfaktoren  $EF$  eines Objektes  $O$  - ebenfalls als kostenbeeinflussendes Element angesehen werden. Die zukünftigen Investitionskosten  $IK_{z,O}$  eines Objekts  $O$  sind eine Funktion von Objekteigenschaften  $OE$ , Einflussfaktoren  $EF$  sowie der Instandhaltungsstrategie  $IS$ :

$$IK_{z,O} = f(OE_O; EF_{BT}; IS_{BT})$$

**Formel 4-5: zukünftige Investitionskosten als Funktion von Objekteigenschaften, Einflussfaktoren und Instandhaltungsstrategie**

## 4.1 Strukturierung von Objekten in Bauteile

Die Maßnahmen der Instandsetzung werden an den einzelnen Bauteilen eines Objekts ausgeführt. Für die Kostenermittlung ist das Objekt  $O$  in Bauteile  $BT_i$  zu gliedern, so dass alle relevanten Kosten erfasst werden können. Diese Kostengliederung soll eine Ordnungsstruktur auf Bauteilebene darstellen, die das Bauwerk anhand der Gebäudesystematik strukturiert. In der Literatur finden sich Regelwerke, welche die Bauwerke bereits in Bauteilgruppen, Leistungsbereiche oder Funktionseinheiten unterteilen. Bauteilgruppen und Funktionseinheiten gliedern das Objekt entsprechend ihrer Funktion. Beispiele hierfür sind die Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten (ASB-ING)<sup>370</sup>, die Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)<sup>371</sup> sowie die Strukturierung nach ZIEGEL<sup>372</sup>. Die Leistungsbereiche des Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau (STLK)<sup>373</sup> der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) gliedern die Leistungen gewerkeweise für die Ausschreibung und Vergabe (vgl. Kapitel 3.4.2). In Abbildung 4-1 sind verschiedene Quellen dargestellt, welche für eine Strukturierung der Bauwerke herangezogen werden können.

---

<sup>370</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: ASB-ING Anweisung Straßeninformationsbank, Segment Bauwerksdaten. 2013.

<sup>371</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2016.

<sup>372</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.

<sup>373</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau. 2022.



Quellen zur Strukturierung der Objekte in Bauteile	
FGSV: Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau (STLK)	Abteilung Straßenbau, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Anweisung Straßeninformationsdatenbank – Segment Bauwerksdaten (ASB-ING)
FGSV: Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)	Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte
BMVI: Anweisung zur Kostenermittlung und Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen 11/20 (AKVS):	FGSV: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO)

Abbildung 4-1: Quellen zur Strukturierung der Objekte in Bauteile

Die Unterteilung eines Objekts, wie sie von den oben genannten Quellen vorgenommen wird, stellen auf oberster Ebene geeignete Betrachtungseinheiten dar, müssen aber auf Bauteilebene strukturiert werden, da z.B. die Funktionseinheit Beleuchtung sowohl Lampen der Adaptionsbeleuchtung als auch der Durchfahrtsbeleuchtung enthält. Diese haben aufgrund der unterschiedlichen Schalthäufigkeit verschiedene Lebensdauern und verursachen somit auch unterschiedliche Kosten im Laufe der Gesamtnutzungsdauer. Die Gliederungen werden so weiterentwickelt, dass jedes kostenverursachende Bauteil einzeln erfasst und das Objekt in seine kostenverursachende Betrachtungseinheiten strukturiert wird.

Auf oberster Ebene wird ein Objekt  $O$  in Funktionseinheiten bzw. in Bauteilgruppen gegliedert, wobei im weiteren Verlauf dieser Arbeit stets von Funktionseinheiten  $FE_k$  gesprochen wird. Eine Gliederung nach Gewerken bezieht sich auf Ausschreibung und Vergabe und eignet sich daher nicht zur Strukturierung von Objekten für die Modellentwicklung im Rahmen dieser Arbeit. Zum einen sind Bauteile mit unterschiedlichen Lebensdauern in einem Leistungsbereich zusammengefasst (Lager und Fahrbahnübergänge, LB 121), zum anderen werden Bereiche wie Kappen oder Schutzeinrichtungen nur unzureichend behandelt.

Abbildung 4-2 stellt den Zusammenhang zwischen Objekt, Funktionseinheit und Bauteilen dar.

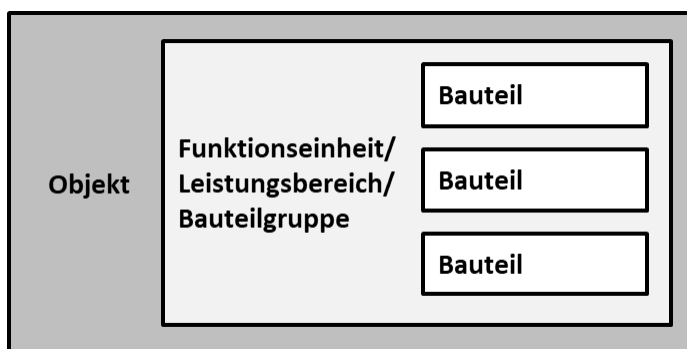


Abbildung 4-2: Mögliche Strukturierung eines Objekts in Bauteile

## 4.2 Bildung von Instandsetzungsgruppen

Die identifizierten Bauteile nach Kapitel 4.1 werden mit Hilfe der in Kapitel 3.2 erläuterten Richtlinien und Literatur auf ihre physischen und funktionalen Abhängigkeiten untersucht. Für die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten sind diese Unabhängigkeiten von großer Bedeutung, da die Lebensdauer eines Bauteils durch ein anderes beeinflusst werden kann (vgl. Kapitel 3.3.1.4). Dabei ist zum einen die Bedeutung der Bauteile für die Instandsetzung und zum anderen die Vernetzung und Beeinflussung der einzelnen Bauteile untereinander zu untersuchen. Aufgrund unterschiedlicher technischer Abhängigkeiten zwischen einzelnen Bauteilen ergeben sich verschiedene Lösungsvarianten hinsichtlich der Instandsetzung. Bauteile, die durch funktionale und physische Abhängigkeiten zusammen instandgesetzt werden müssen, werden zu einer Instandsetzungsgruppe  $IG_j$  zusammengefasst.

Anhand bestimmter Kriterien sollen die Zusammenhänge der einzelnen Bauteile identifiziert und verschiedene Instandsetzungsgruppen hergeleitet werden, um eine Entscheidung hinsichtlich einer bauteilbezogenen Instandsetzungsmaßnahme zu erleichtern. Auf Grundlage dieser Instandsetzungsgruppen können die damit verbundenen Kosten kalkuliert werden. Sie stellt damit nicht nur eine Entscheidungshilfe bei Instandsetzungsmaßnahmen dar, sondern unterstützt auch die genauere Budgetierung.

Die Herausforderung liegt darin, dass bei Erreichen der technischen Lebensdauer einzelner Bauteilschichten auch intakte Bauteilschichten bei Instandsetzungsmaßnahmen mit ausgetauscht werden müssen, obwohl sie die technische Lebensdauer noch nicht erreicht haben. Dies liegt nicht nur an der Unterscheidung hinsichtlich lang- und kurzlebiger Bauteile, sondern auch an der Gebäude- oder Bauteilkonstruktion sowie an den verwendeten Verbindungsmaterialien. Auch die Integration technischer Anlagen ist davon betroffen.

Auf Basis von Kapitel 3.3.5 lassen sich zusammenfassend die Bauteile einer Funktionseinheit hinsichtlich der folgenden Kriterien für eine bauteilbezogene Instandsetzungsplanung untersuchen:

### **Zugänglichkeit**

Es ist die Lage der Bauteile zu bestimmen, denn diese beeinflussen eine Instandsetzung wesentlich. Sichtbare Bauteile können einfacher ausgetauscht werden als verdeckte, da die Zugänglichkeit deutlich einfacher ist. In der Regel bringt ein verdecktes Bauteil immer eine Beeinflussung anderer Bauteile mit sich. Daher wird festgelegt, ob es sich um ein sichtbares (S) oder verdecktes (V) Element handelt.

### **Konstruktive Verbindungen**

Eine Instandsetzung wird im Wesentlichen von der konstruktiven Verbindung zu angrenzenden Bauteilen bzw. Schichten beeinflusst. Es wird grundsätzlich zwischen Flächenverbindungen (F) und Einzelverbindungen (E) unterschieden. Außerdem können konstruktive Verbindungen hinsichtlich ihrer Lösbarkeit, dem Verbindungstyp, betrachtet werden. Die Bauteile und Materialschichten innerhalb einer Konstruktion sind daher auf lösbar (L) oder unlösbar (NL) zu untersuchen. Daraus ergeben sich drei Alternativen. Alle mit „lösbar“ klassifizierten Bauteile

lassen sich unabhängig und eigenständig instandsetzen. Sie beeinflussen keine angrenzenden Bauteile und sind die einfachste Variante in Bezug auf einen Austausch.

Abbildung 4-3 fasst die zu untersuchenden Kriterien in einer Darstellung zusammen:

Funktionseinheit A	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abkürzung (...)	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Bauteil 1						
Bauteil 2						
Bauteil 3						
Bauteil 4						

Abbildung 4-3: Analyse der physischen Abhängigkeiten von angrenzenden Bauteilen

### 4.3 Herleitung eines Verfahrens zur Bestimmung der technischen Lebensdauer LD unter Berücksichtigung der Strategie

Ein bedeutender Aspekt bei der Bestimmung der zukünftigen Investitionskosten ist die Lebensdauer eines Bauteils  $BT_i$ . Hieraus ergibt sich die Austauschrate  $\alpha$  (vgl. Formel 4-1) und somit die Häufigkeit und Zeitpunkte der anfallenden Zahlungen während des Lebenszyklus eines Objekts. Für eine fundierte und zuverlässige Kostenplanung der Instandsetzungskosten sind Informationen über das Ausfallverhalten der einzelnen Bauteile notwendig. Das Ausfallverhalten kann, wie in Kapitel 3.4.1 beschrieben, über den Abbau des Abnutzungsvorrates dargestellt werden. Das Ende des Abnutzungsvorrates ist durch die technische Lebensdauer eines Bauteils gekennzeichnet.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Ausfälle infolge von Verschleiß und Alterung betrachtet. Ursachen für Frühausfälle sind nach BERTSCHE UND LECHNER meist Fehler bei der Montage oder Konstruktion.<sup>374</sup> Derartige Ausfälle sind in der Regel durch die Gewährleistung abgedeckt und verursachen somit keine Kosten für den Betreiber.<sup>375</sup> Die Ausfälle der dritten Phase ergeben sich durch Verschleiß und Abnutzung. Der Zeitpunkt dieser Ausfälle kann mit detaillierten Informationen über das Ausfallverhalten prognostiziert werden. Die genaue Verteilung ist in der Regel unbekannt. Grundlage zur Ermittlung dieser Funktionen bildet die Dokumentation von Ausfallzeitpunkten. Diese müssen über Jahre hinweg dokumentiert werden, um eine Datensammlung für die Beschreibung des Ausfallverhaltens zu schaffen. So können Wahrscheinlichkeiten bezüglich des Zustandsverlaufs einzelner Bauteile ermittelt werden. Die Zustandsverlaufkurven geben die Verringerung des Abnutzungsvorrates über die Zeit wieder. Mit

<sup>374</sup> Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S.36.

<sup>375</sup> Vgl. Vogt, Peter: Modell zur Lebenszykluskosten von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten. Dissertation. Ruhr- Universität Bochum. Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften. Bochum 2012.

Hilfe der Kurven kann die Wahrscheinlichkeit in jeder Betrachtungsperiode (z.B. pro Jahr) bestimmt werden, mit der ein Bauteil ausfällt (Ausfallwahrscheinlichkeit).

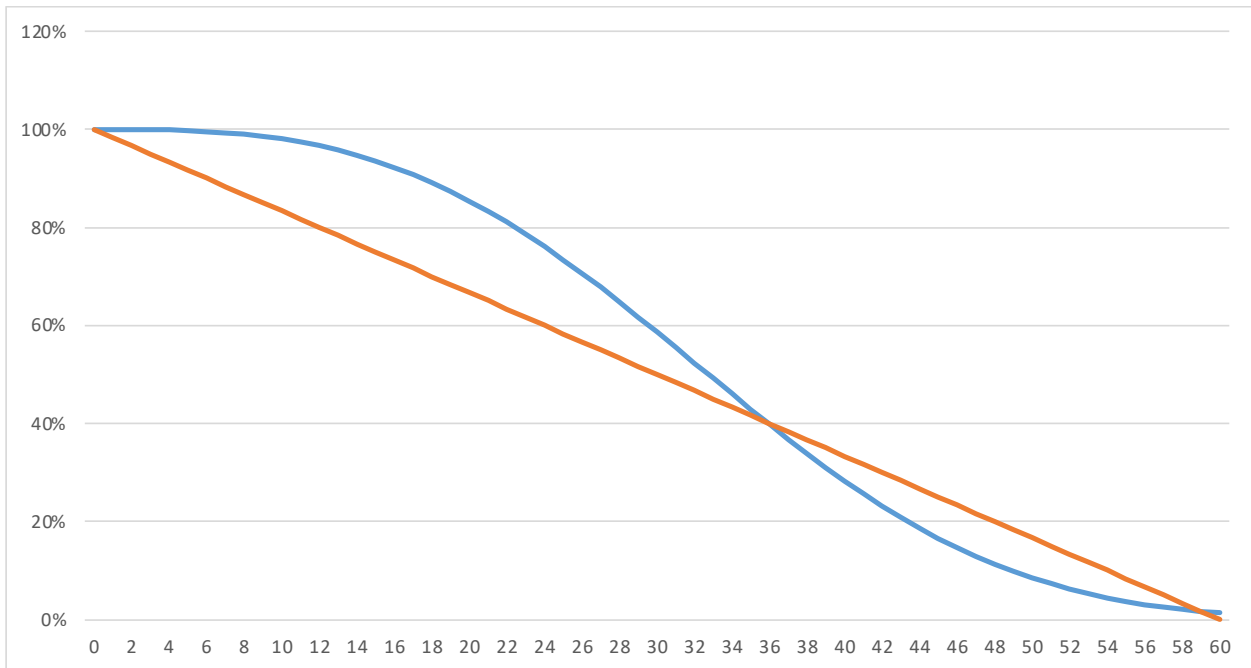
### 4.3.1 Quantifizierung der technischen Lebensdauer

Die Ausfallzeit eines Bauteils ist das Ergebnis eines stochastischen Prozesses und unterliegt einer bestimmten Verteilung. Folglich lässt sich dieser Prozess über stochastische Modelle beschreiben.<sup>376</sup> Liegt eine homogene Stichprobe vom Umfang  $n$  vor, kann mit den in Kapitel 3.5.3 beschriebenen wahrscheinlichkeitstheoretischen Modellen die Lebensdauer und somit die Verringerung des Abnutzungsvorrates bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Modelle lässt sich ein Restpotential des Bauteils hinsichtlich seiner Funktionsfähigkeit zu einem bestimmten Zeitpunkt beurteilen. Da die Wahrscheinlichkeit für einen Ausfall des Bauteils mit steigender Lebensdauer zunimmt, ist die vereinfachte Annahme einer linearen Abnahme nicht zutreffend. Wird eine lineare Abnahme des Abnutzungsvorrates zugrunde gelegt, wird in den ersten Jahren der Lebensdauer eine zu hohe Ausfallwahrscheinlichkeit angenommen. Dies ermöglicht keine Anwendung der verschiedenen Instandhaltungsstrategien, welche sich an dem noch vorhandenen Abnutzungsvorrat orientieren. Durch die zu hoch angesetzte Ausfallwahrscheinlichkeit zu Beginn des Lebenszyklus einer Betrachtungseinheit, kommt es bei einer vorausbestimmten Instandhaltung zu früh zu einem Austausch des Bauteils. Abbildung 4-4 zeigt qualitativ einen linearen Verlauf des Abnutzungsvorrates sowie den Verlauf nach einer Weibullverteilung für Verschleißausfälle ( $b > 1$ ). Hier ist deutlich zu erkennen, dass eine Abnutzungsgrenze von bspw. 75 % bei einem linearen Verlauf früher erreicht ist. Für jede Art von Verteilung gilt, dass der Abnutzungsvorrat zu Beginn bei 100 % liegt.

$$f(t = 0) = 100$$

---

<sup>376</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 163.



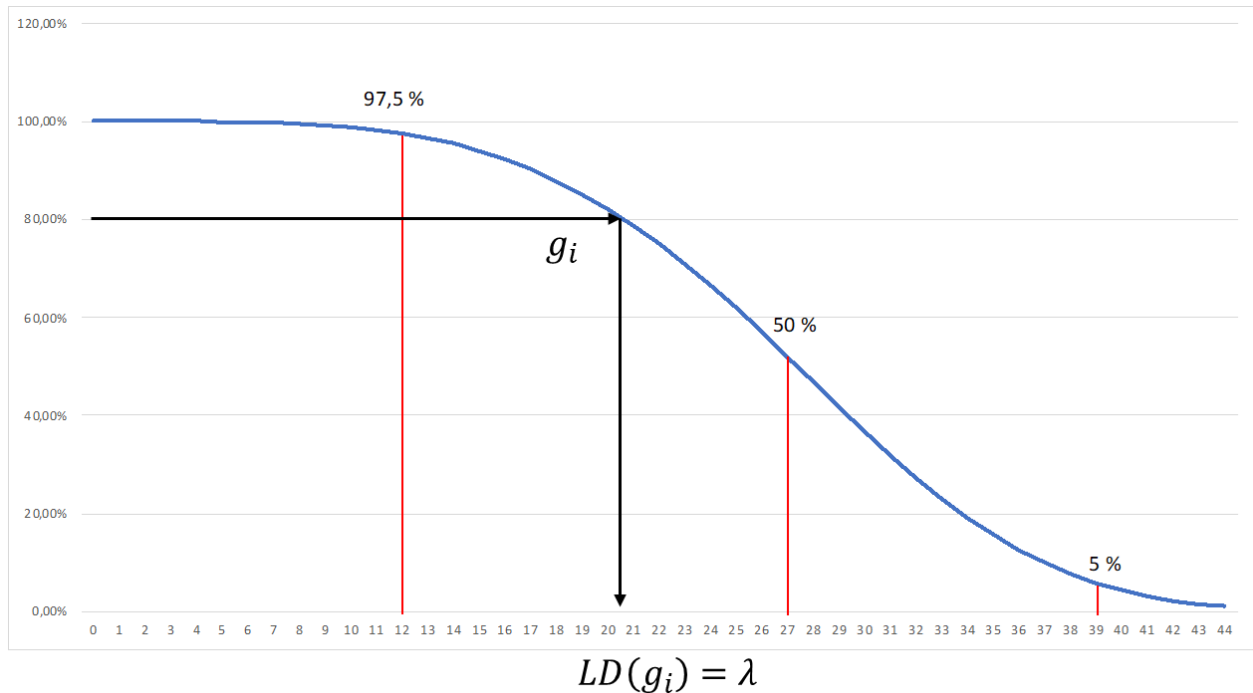
**Abbildung 4-4: Vergleich eines linearen Verlaufs und einer Weibullverteilung**

Die Ausnutzung des Restpotentials des Abnutzungsvorrates eines Bauteils lässt sich durch die Wahl einer Instandhaltungsstrategie (aufgeschobene/ sofortige/ zustandsorientierte/ vorausbestimmte, vgl. Kapitel 3.1.2) beeinflussen, wodurch die Häufigkeit der Maßnahmen und damit auch der Ausfälle bestimmt wird. Die Anwendung der aufgeschobenen Instandhaltung nutzt den kompletten Abnutzungsvorrat eines Elements aus, während bei der vorausbestimmten Instandhaltung Restpotential verschenkt wird. Die Ausnutzung des Abnutzungsvorrates ist in Abbildung 4-5 dargestellt. Bei einer vorausbestimmten Instandhaltung einer bestimmten Betrachtungseinheit werden bspw. 97,5 % des Abnutzungsvorrates verschenkt. Bei einer aufgeschobenen Instandhaltung wird der Abnutzungsvorrat bis auf 5 % komplett ausgenutzt.<sup>377</sup> Durch Kenntnisse des Verlaufs des Abnutzungsvorrates können die Lebensdauern unter Berücksichtigung der verschiedenen Instandhaltungsstrategie bestimmt werden. Die verschiedenen Instandhaltungsstrategien werden durch festzulegende Grenzen  $g_i$  des Abnutzungsvorrates unterschieden. Diese Zusammenhänge zwischen der Häufigkeit der Maßnahmen und dem Nutzenverlust nutzte auch ZIEGEL, für die Empfehlung von Instandhaltungsstrategien (vgl. Kapitel 3.1.3). Durch die Wahl der Abnutzungsgrenze  $g_i$  kann die Lebensdauer eines Bauteils bestimmt werden. Die Lebensdauer in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie wird mit  $\lambda$  bezeichnet:

$$LD(g_i) = \lambda$$

**Formel 4-6: Lebensdauer in Abhängigkeit der Instandhaltungsstrategie**

<sup>377</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 156.



**Abbildung 4-5: Beispielhafter Verlauf des Abnutzungsvorrates und Instandsetzungsgrenzen<sup>378</sup>**

Bei einer rein betriebswirtschaftlichen Betrachtungsweise stellt die Instandhaltung mit den niedrigsten Gesamtkosten die vorteilhafteste Variante dar. Aus volkswirtschaftlicher Sicht hingegen gilt diejenige Instandhaltung als die optimale Wahl, bei der die Verfügbarkeit maximal wird. Für die Wahl einer optimalen Instandhaltung sind folglich sowohl alle betriebswirtschaftlichen als auch volkswirtschaftlichen Informationen von Bedeutung.<sup>379</sup>

Das entwickelte Modell soll in der Lage sein, verschiedene Instandhaltungsstrategien zu berücksichtigen, so dass die zukünftigen Investitionskosten für die unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien berechnet werden können. Innerhalb des Modells kann für jedes Bauteil eines Objekts eine eigene Instandhaltungsstrategie festgelegt werden und die mit einer höheren Verfügbarkeit einhergehenden erhöhten Kosten berechnet werden, um die verschiedenen Strategien auch aus betriebswirtschaftlicher Sicht zu bewerten. Dies geschieht unter Berücksichtigung der Abhängigkeiten und Verflechtungen der Bauteile, wie sie in Kapitel 4.2 beschrieben wurden. Sämtliche Bauteile, welche im Rahmen der Herleitung der Objektstruktur aus Kapitel 4.1 identifiziert werden, fließen mit in die Berechnung ein.

In Kapitel 3.5 wurden verschiedene Verfahren vorgestellt, mit denen es möglich ist, die Lebensdauer von Bauteilen abzuschätzen. Dem Ausfallverhalten der Bauteile liegt eine bestimmte Verteilung zugrunde, die im Allgemeinen nicht bekannt ist und abgeschätzt werden muss. Für das hier entwickelte Modell wird das Bauwerk in seine einzelnen

<sup>378</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 156.

<sup>379</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 164.

kostenverursachenden Elemente, den Bauteilen untergliedert. Es kann unterstellt werden, dass das Ausfallverhalten dieser Bauteile unabhängig voneinander ist.

Auf Basis der Extremwerttheorie aus Kapitel 3.5.4 lassen sich für das hier entwickelte Modell Annahmen treffen: Jedes Bauteil selbst besteht aus einer Vielzahl an Komponenten, welche das Ausfallverhalten des gesamten Bauteils bestimmen. Unter der Annahme, dass ein Bauteil ausfällt, sobald die schwächste Komponente defekt ist (Serienstruktur), ist es ausreichend, nur diejenigen Komponenten zu betrachten, die zu einem Ausfall des Bauteils führen. Diese Annahme ist in Abbildung 4-6 dargestellt und kann für eine Vielzahl von technischen Elementen und Bauteilen getroffen werden. Ebenso kann unterstellt werden, dass das Ausfallverhalten sämtlicher Bauteile und Komponenten unabhängig voneinander ist.

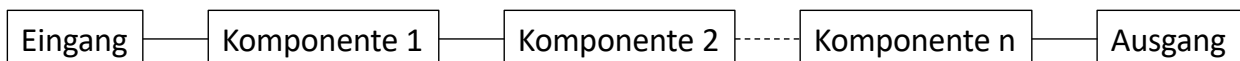


Abbildung 4-6: Annahme einer Serienstruktur eines Bauteils

Grundsätzlich ist eine Datensammlung der Größe  $n$  notwendig. Aus dieser Datensammlung ergeben sich  $n$  unabhängig, identisch verteilte Zufallsgrößen (u.i.v.)  $X_1, X_2, \dots, X_n$  mit Verteilungsfunktion  $F(x)$ , von denen das Minimum interessant ist.

$$Y_n = \min(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

Es kann angenommen werden, dass die Beobachtungswerte  $X_1, \dots, X_n$ ,  $X_j$ ,  $1 \leq j \leq n$ , unabhängig, identisch verteilte Zufallsgrößen sind. Dabei wird mit  $X = Y_n$  das Minimum von  $X_j$  bezeichnet. Das bedeutet, die ausfallfreie Zeit dauert bis zum Zeitpunkt  $Y_n$ , wobei  $X_j$  die Zeit der  $j$ -ten Komponente bis zum Ausfall bezeichnet und  $n$  die Anzahl an Komponenten ist. Die Ausfallzeiten sind zufällig und damit auch die Minimal- und Maximalzeiten. Die Verteilung von  $Y_n$  ist vom selben Typ wie  $X_1$ . Für die Verteilungsfunktion  $F(x)$  muss gelten:

$$\begin{aligned} X &\geq 0 \text{ und} \\ P(X \leq x) &= F(x) \text{ und} \\ F(0) &= 0. \end{aligned}$$

Diese Annahmen gelten, da die Lebensdauer eines Bauteils nicht negativ sein kann und zum Zeitpunkt 0 die Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil ausfällt, gleich 0 beträgt.

Mit  $Z(x)$  kann die Verteilung des Minimums von  $X_1, \dots, X_n$  bezeichnet werden:

$$Z(x) = P(Y_n < x)$$

**Formel 4-7: Verteilung von  $X_1, \dots, X_n$**

Wenn es gemäß der Extremwerttheorie Konstanten  $a_n$  und  $b_n > 0$  und eine Grenzfunktion  $G(x)$  für  $n \rightarrow \infty$  gibt, so dass gilt:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Z(a_n + b_n x) = G(x),$$

**Formel 4-8: Grenzfunktion  $G(x)$**

gibt es nach dem Fisher- Tippet Theorem (vgl. Kapitel 3.4) drei mögliche Verteilungstypen für die Extremwertverteilung. Da es sich bei den hier betrachteten Werten um Lebensdauerdaten handelt, muss der untere Endpunkt der Funktion endlich sein und kann nicht kleiner als null werden. Daher ergibt sich als Verteilungstyp die Weibullverteilung. Mit ihr werden Verschleißausfälle, welche der dritten Phase der sogenannten Badewannenkurve zugeordnet werden, beschrieben.

Da es sich bei dem hier betrachteten Prozess um Verschleißausfälle handelt, welche der dritten Phase der Badewannenkurve zugeordnet werden, gilt auch dass  $b > 1$  sein muss.

In Kapitel 3.5.3 wurde die Weibullverteilung für die Beschreibung des Ausfallverhaltens von Bauteilen bereits eingeführt. Diese enthält den Formparameter  $b$  sowie den Lageparameter  $T$ . Die genauen Werte der unbekannt Parameter der Verteilung ergeben sich aus der Datensammlung. Die gesammelten Beobachtungswerte bzw. die Lebensdauern der Bauteile, sind abhängig von verschiedenen Einflussfaktoren. Daher können die Parameter  $b$  und  $T$  als Funktion der Einflussfaktoren angesehen werden:

$$(b, T) = f(EF_{ON,m,k})$$

**Formel 4-9: Abhängigkeit der Weibullparameter von den Einflussfaktoren**

Für die Bestimmung der unbekannt Parameter  $b$  und  $T$  gibt es verschiedene mathematische Verfahren, welche in Kapitel 3.4.5 dargestellt wurden. Um jede Art von Stichprobe (zensiert/ unzensiert) auswerten zu können, wird auf das Verfahren der Maximum-Likelihood Methode zurückgegriffen.

Durch Auflösen der Maximum Likelihood- Funktion ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{\sum_{i=1}^n t_i^b \ln(t_i)}{\sum_{i=1}^n t_i^b} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(t_i) - \frac{1}{b} = 0$$

**Formel 4-10: Aufgelöste Maximum-Likelihood- Funktion zur Bestimmung von  $b$**

Diese Beziehung muss zur Berechnung von  $b$  iterativ bspw. mit dem Newton Verfahren gelöst werden. Nach der Bestimmung des Parameters  $b$ , kann  $T$  direkt berechnet werden:

$$T = \left( \left( \sum_{i=1}^n t_i^b \right) \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{b}}$$

**Formel 4-11: Bestimmung des Parameters  $T$**

Die Verringerung des Abnutzungsvorrates bezieht unvorhersehbare Katastropheneinwirkungen (wie z.B. Brandfall, Unfälle mit nachfolgender Beschädigung der Baukonstruktion) nicht mit ein. Risikobewertungen sind ebenfalls nicht Gegenstand dieser Arbeit. Es wird von einer 100 %



Instandhaltungsqualität ausgegangen, d.h. alle Maßnahmen der Instandhaltung werden regelmäßig durchgeführt (Wartung, Inspektion, bauliche und betriebliche Unterhaltung). Es werden nur Schäden betrachtet, die durch Verschleiß, auf Grund des Alters eines Bauteils hervorgerufen werden. Es wird von einem fehlerfreien Einbau des Bauteils ausgegangen.

### 4.3.2 Datenerfassung und -auswertung

Für die Anwendung des in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Verfahrens zur Ermittlung des Abnutzungsverlaufs ist eine strukturierte Datensammlung von Austauschzeitpunkten Voraussetzung. Es kann unterstellt werden, dass der Zustand der Fahrbahnen bei den heutigen Bauweisen zum Zeitpunkt des Neubaus unabhängig von der Bauart nahezu gleich ist. Der Verlauf kann jedoch je nach Beanspruchung durch Verkehr und Klima sowie die angewandte Instandhaltungsstrategie stark unterschiedlich sein. Die daraus resultierenden Kosten variieren entsprechend in Höhe und Zeitpunkt des Anfallens. Die Abnutzungskurve verläuft je nach Umgebungsbedingungen nicht immer auf die gleiche Weise. Bauteile sind durch ein nicht immer gleiches Abnutzungsverhalten gekennzeichnet. Daher müssen die Daten zu Austauschzeitpunkten in Abhängigkeit der Einflussfaktoren erfasst werden. Um die Austauschzeitpunkte nach einer immer gleichen Systematik zu erfassen, wird eine Standardisierung der Einflussfaktoren vorgenommen.

In Kapitel 3.3.2.2 wurden die verschiedenen Einflussfaktoren auf die Lebensdauern von Bauteilen beschrieben. Im Rahmen der Dokumentation von Ausfallzeitpunkten müssen diese Einflussfaktoren berücksichtigt werden. Zunächst muss das Objekt  $O$  nach der in Kapitel 4.1 vorgestellten Methodik strukturiert werden. Die Daten dieser Bauteile  $BT_i$  müssen so erfasst werden, dass die Grundgesamtheit eine homogene Population darstellt und nur Komponenten zu einer Stichprobe zusammengefasst werden, deren Betriebs- und Umgebungsbedingungen gleich oder hinreichend ähnlich sind. Es ist nicht zielführend, das Abnutzungsverhalten von Bauteilen zu vergleichen, welche bspw. einer anderen Nutzungsintensität unterliegen. Wie in Kapitel 3.3.2.5 gezeigt gibt es in der Literatur teilweise erhebliche Unterschiede zwischen den Lebensdauerangaben, die vermutlich auf unterschiedliche Belastungen und Einflüsse zurückzuführen sind.

Zur Sammlung der Daten wird eine grundlegende Strukturierung geschaffen, die die relevanten Einflussfaktoren auf die Lebensdauern enthält. Dabei ist zu beachten, dass nicht für alle Bauteile die gleichen Einflussfaktoren von Bedeutung sind. Beispielsweise wird sich die Lebensdauer eines Fahrbahnübergangs verringern, desto größer die Verkehrsbelastung ist. Für die Entwässerungsröhre spielt die Nutzungsintensität der Brücke allerdings nur eine untergeordnete Rolle. Die Lebensdauer  $LD$  eines Bauteils  $BT_i$  ist eine Funktion aller Einflussfaktoren  $EF_i$ . Neben den Einflussfaktoren beeinflusst die Instandhaltungsstrategie die Lebensdauer eines Bauteils maßgeblich, so dass diese ebenfalls miterfasst werden muss. Die Daten jedes Bauteils  $BT_i$  sind unter Berücksichtigung der spezifischen Einflussfaktoren  $EF_i$  sowie der angewendeten Instandhaltungsstrategie zu erfassen.

$$LD_{BT_i} = f(EF_i, IS_i)$$

**Formel 4-12: Abhängigkeit der Lebensdauer von den Einflussfaktoren**

Die identifizierten Einflussfaktoren werden in einem nächsten Schritt in Cluster eingeteilt. Die Einteilung kann beispielsweise aus drei Clustern bestehen:

- Cluster 1 = schwacher Einfluss
- Cluster 2 = mäßiger Einfluss
- Cluster 3 = starker Einfluss

Für jedes Bauteil ist innerhalb der definierten Cluster eine Stichprobe vom Umfang  $n$  zu sammeln. Dabei ist für jedes Bauteil gemäß einer Einflussmatrix zu prüfen, welche Faktoren die Lebensdauer beeinflussen. Es können nur Bauteile zu einer Stichprobe zusammengefasst und ausgewertet werden, welche den gleichen Einflussbedingungen unterliegen und eine homogene Stichprobe bilden. Beinhaltet eine Stichprobe Bauteile, welche unterschiedlichen Einflussbedingungen unterliegen, werden sich Diskrepanzen zwischen den gesammelten Daten ergeben. Aussagekräftige Informationen zu den Instandsetzungszeitpunkten können somit nicht gemacht werden.

Wie gezeigt, gilt die Instandsetzungsstrategie als wesentlicher Einflussparameter, denn sie beeinflusst den Austauschzeitpunkt eines Bauteils maßgeblich (vgl. Abbildung 4-5). Eine Durchführung der Instandsetzungen von Infrastrukturbauwerken nach diesen Strategien wird aktuell nicht konsequent angewendet. Um keine Verfälschung der Daten zu erhalten, ist es notwendig für die Datensammlung vom Umfang  $n$  nicht nur das Alter  $x$  des Bauteils  $i$  zum Zeitpunkt des Austauschs zu erfassen, sondern auch dessen Zustand  $Z_i, i = (1, \dots, n)$ , denn nicht immer wird ein Bauteil erst am Ende seiner technischen Lebensdauer ausgetauscht. Legt man der Datensammlung und der dazugehörigen Auswertung zugrunde, dass die gesammelten Werte tatsächlich dem Ende der technischen Lebensdauer der Bauteile entsprechen, obwohl einige Bauteile bereits einige Jahre zuvor – aus unterschiedlichen Gründen – ausgetauscht wurden, wäre das Ergebnis der Auswertung die mittlere Verweildauer eines Bauteils im Bauwerk. Diese Angaben sind für eine Instandsetzungsplanung unter Berücksichtigung der Instandsetzungsstrategie nicht geeignet. Die so gewonnenen Verweildauern wurden an Bauteilen ermittelt, welche unterschiedliche Zustände beim Austausch hatten und bilden somit nicht die technische Lebensdauer eines Bauteils ab. Daher müssen sowohl der Zeitpunkt  $t$  als auch der Zustand  $Z$  eines Bauteils erfasst werden.

Das Alter des Bauteils zum Zeitpunkt des Austauschs ist in Jahren anzugeben. Der Zustand muss in Prozent angegeben werden. Die Qualität zum Zeitpunkt des Austauschs eines Bauteils lässt sich für Ingenieurbauwerke über die Schadensbewertungen, welche im Rahmen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 vergeben werden, ermitteln. Die RI-EBW Prüf (vgl. Kapitel 3.2.2) gibt verschiedene Schadensbeispiele mit zugehörigen Bewertungen für Bauteile an. Auf dieser Basis kann der Zustand der Bauteile und somit ein möglicher Qualitätsverlust bewertet werden. Die Schäden, die im Rahmen der Prüfungen festgestellt werden, sind prinzipiell einer Messung zugänglich (z.B. Messung der Rissbreiten bei Beton, Größe des Gleitspaltes bei Lagern) und können daher für die Beurteilung der noch vorhandenen Qualität dienen. Für Straßenverkehrswege gilt dieses Vorgehen analog. Die Schadensbewertungen erfolgen nach den Zustandsklassen des Arbeitspapiers 9 der Forschungsgesellschaft für Straßen- und

Verkehrswesen.<sup>380</sup> Anhand der festgestellten Schäden wird den Bauteilen eine Schadensbewertung zugeordnet. Die Ri-EBW-Prüf gibt 5 Bereiche (0 – 4) für die Schadensbewertung von Bauteilen an, wobei „0“ die beste Bewertung und „4“ die schlechteste darstellt. Es kann unterstellt werden, dass diese Bereiche auf einer linearen Skala der Qualität basieren. Unter der Annahme einer linearen Skala werden Zustandsbereiche  $ZB$  in Prozent gebildet. Es wird ein sechster Bereich ergänzt, der den Bereich des Ausfalls darstellt. Diese Ergänzung ist erforderlich, da stetige Zufallsvariablen gegen den Wert „0“ gehen, diese jedoch nie erreichen. Den Schadensbewertungen werden auf diesen Grundlagen folgende Zustandsbereiche zugeordnet:

Schadensbewertung nach Ri-EBW-Prüf	Zustandsbereich [%]
0	86
1	71
2	57
3	43
4	29
5	0

Tabelle 4-1: Umwandlung der Schadensbewertung in Zustandsbereiche

Die gesammelten Daten zu Zustandsbereich nach Tabelle 4-1 und Lebensdauern von Bauteilen werden in eine Lebensdauerdatenbank eingetragen. Diese Daten werden mit Hilfe der Weibullverteilung nach dem in Kapitel 4.3.1 vorgestellten Verfahren ausgewertet. Zu beachten ist, dass die Auswertung für jeden Zustandsbereich  $ZB_j$ ,  $j = (0 - 4)$ , einzeln erfolgen muss, woraus sich insgesamt fünf Verteilungsfunktionen  $F_j'(x)$ ,  $j = (0, \dots, 4)$ , ergeben, da wie beschrieben eine Durchmischung der Daten die mittlere Verweildauer als Ergebnis hätte und nicht die technische Lebensdauer.

Die Verteilungsfunktionen stellen den Verlauf der Abnutzung bei unterschiedlichen Zuständen dar. Wertet man bspw. Daten von Bauteilen aus, denen allen zum Zeitpunkt des Ausbaus eine Schadensbewertung von „2“ zugeordnet wurde, gibt diese Verteilung den Verlauf der Abnutzung eben für diesen Zustandsbereich wieder. Der Erwartungswert  $E_2'(x)$  dieser Verteilung  $F_2'(x)$ , kennzeichnet demnach den Wert, der im Mittel bei einem Zustand mit Schadensbewertung 2 erreicht wird.

Die Erwartungswerte  $E_j'(x)$  der Verteilungsfunktionen  $F_j'(x)$  der verschiedenen Zustandsbereiche  $ZB_j$  geben den Verlauf der Weibullverteilung  $F(x)$  für die technische Lebensdauer vor. Es ist dabei ausreichend, zwei Verteilungsfunktionen  $F_j'(x)$  zu bestimmen, um die beiden Parameter der Weibullverteilung  $F(x)$  für die technische Lebensdauer zu berechnen. Aus den Erwartungswerten der Zustandsbereiche  $m$  und  $k$  ( $0 < m, k < 4, m \neq k$ ) lassen sich die benötigten Parameter für die Weibullverteilung  $F(x)$  für alle Zustandsbereiche berechnen:

<sup>380</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: Arbeitspapier Nr. 9/A1.1. Ausgabe 2001.

$$F(x = E'_m(x)) = 1 - e^{-\left(\frac{E'_m(x_m)}{T}\right)^b} = ZB_m$$

$$F(x = E'_k(x)) = 1 - e^{-\left(\frac{E'_k(x_k)}{T}\right)^b} = ZB_k$$

**Formel 4-13: Berechnung der Parameter der Weibullverteilung aus den Erwartungswerten der Zustandsbereiche**

Zu beachten ist, dass die Erwartungswerte  $E'_j(x)$  aus den Verteilungsfunktionen gewonnen werden, welche sich aus den Messungen der Stichproben ergeben. Daher sind diese Erwartungswerte streng genommen die Mittelwerte der Stichprobe und entsprechen demzufolge nicht den Erwartungswerten der Grundgesamtheit. Daher muss eine entsprechende Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt werden, um diese Unschärfe des Modells zu berücksichtigen. Hierfür werden Methodiken aus dem Bereich der Fehlerrechnung verwendet, um ein Konfidenzintervall für die berechneten Parameter anzugeben. Für eine große Anzahl an Messungen ( $n > 30$ ) kann die Verteilung der Wahrscheinlichkeiten der Erwartungswerte durch die Normalverteilung beschrieben werden (zentraler Grenzwertsatz). Die Resultate für die Erwartungswerte streuen um den „wahren“ Erwartungswert. Diese Streuung lässt sich über den Standardfehler berechnen (vgl. Kapitel 3.5.6).

Für eine Verteilungsfunktion  $F'_j(x)$  lässt sich die Standardabweichung  $s_j$  nach Formel 3-11 berechnen. Für die Berechnung des Standardfehlers  $\sigma_{x,j}$  der Verteilung wird Formel 3-23 angewendet. Daraus ergibt sich:

$$\sigma_{x,j} = \frac{s_j}{\sqrt{n}}$$

**Formel 4-14: Berechnung des Standardfehlers für  $F'_j(x)$**

Es wird ein 95 % Konfidenzintervall gewählt ( $\alpha = 0,05$ ), welches symmetrisch um den Erwartungswert konstruiert wird. Dieses lässt sich entsprechend berechnen zu:

$$E'_j(x) \pm 1,96 \cdot \sigma_{x,j}$$

**Formel 4-15: Berechnung des Konfidenzintervalls für  $E'_j(x)$**

Aus Formel 4-14 ist ersichtlich, dass sich der Standardfehler für große Stichproben vernachlässigen lässt. Durch dessen Berücksichtigung können aber auch kleinere Stichproben ausgewertet werden. Die Unschärfe bzw. das Konfidenzintervall wird dementsprechend größer.

Abbildung 4-7 fasst das Vorgehen zur Datensammlung für die Lebensdauerermittlung zusammen. Ziel der Auswertung einer Datensammlung ist es, das Ausfallverhalten von Bauteilen zu modellieren, um die Lebensdauer und somit den Instandsetzungszeitpunkt bestimmen zu können. Diese Datensammlung ist mit den entsprechenden Parametern (Alter, Zustand, Einflussfaktoren) in eine Datenbank einzutragen, die für die Auswertung herangezogen wird. In Abbildung 4-8 sind die einzelnen Schritte zur Auswertung der Datensammlung dargestellt.

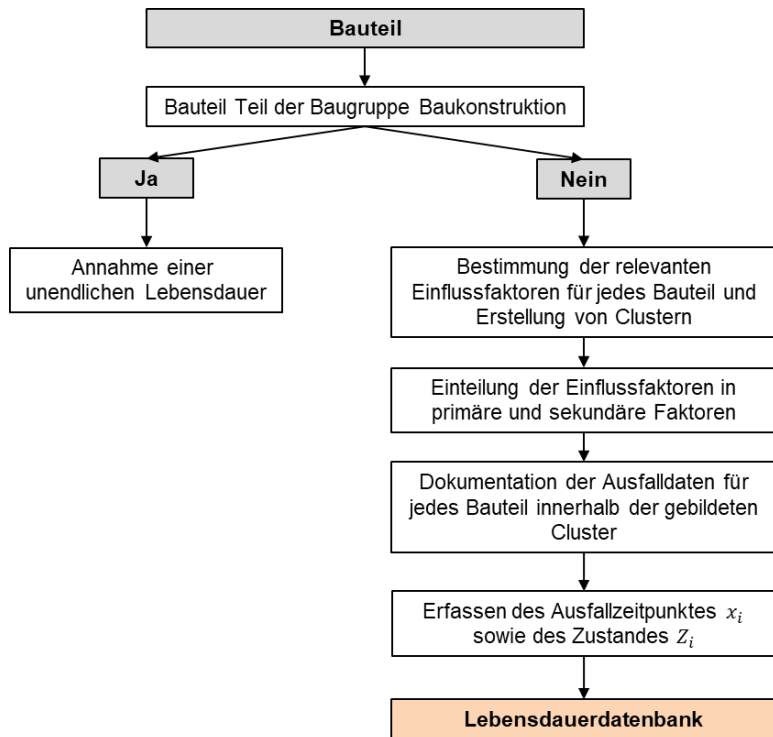


Abbildung 4-7: Vorgehen zur Datensammlung

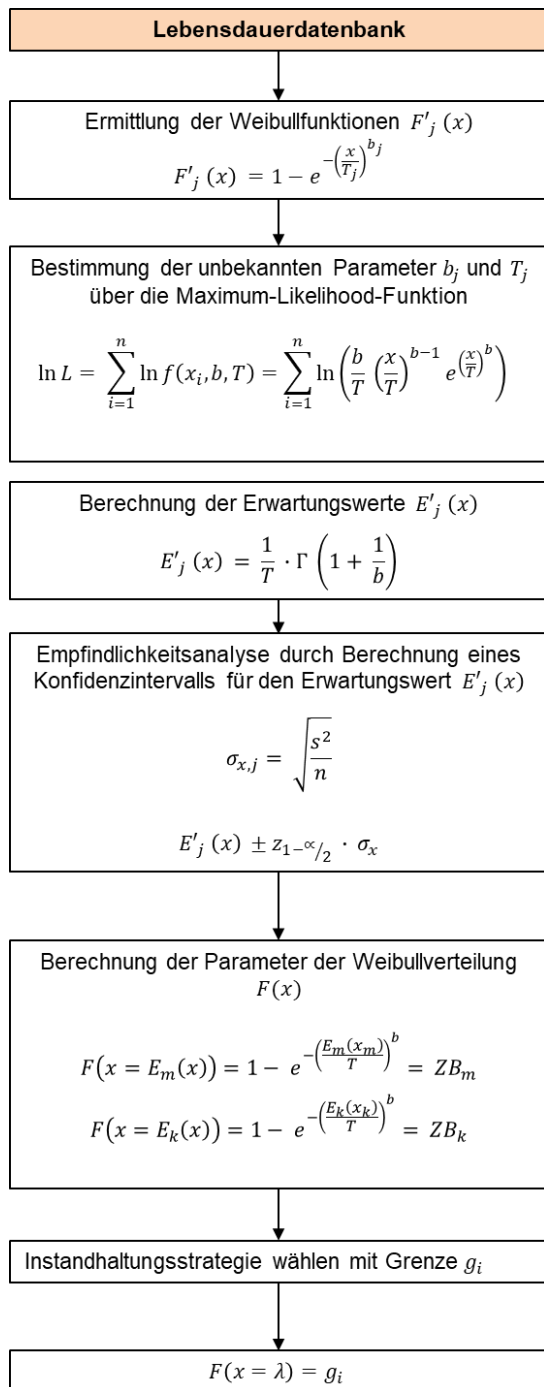


Abbildung 4-8: Vorgehen zur Auswertung der Datensammlung

### 4.3.3 Bestimmung der Instandsetzungsreihenfolge von Bauteilen einer Instandsetzungsgruppen

Die Lebensdauer  $\lambda$  ist der ausschlaggebende Faktor für eine Instandsetzungsmaßnahme. Er bestimmt, zu welchem Zeitpunkt oder nach welcher Zeitspanne ein Bauteil auszutauschen ist. Die gebildeten Instandsetzungsgruppen erfordern einen einheitlichen Instandsetzungszeitpunkt. Daher basiert der Berechnungsansatz auf Basis von Instandsetzungsgruppen auf einer Lebensdaueranpassung. Jede Instandsetzungsgruppe enthält ein maßgebendes Bauteil. Die Instandsetzung dieses Bauteils bringt eine Instandsetzung der anderen Bauteile der Instandsetzungsgruppe mit sich. Es ist nicht zielführend, dass jedes Bauteil einer Gruppe die Lebensdauer desjenigen Bauteils annimmt, das die geringste technische Lebensdauer besitzt. Es muss daher ein Verfahren aufgestellt werden, mit dem für jede Instandsetzungsgruppe die wirtschaftlich optimale Reihenfolge von Instandsetzungen untersucht werden kann.

Es ist zu beachten, dass für jedes Objekt einzeln geprüft werden muss, wie Instandsetzungsgruppen erneuert werden, da sich die Instandsetzungszeitpunkte der einzelnen Bauteile durch die unterschiedlichen Strategien und Einwirkungen bei jedem Objekt unterscheiden und damit auch die maßgebende Lebensdauer.

Es ist eine Instandsetzungsgruppe  $IG_j$  bestehend aus einer endlichen Anzahl an  $n$  Bauteilen  $BT$  nach den hergeleiteten Kriterien aus Kapitel 4.2 zu definieren. Eines der Bauteile wird als maßgebendes Bauteil bezeichnet und bringt die Erneuerung der gesamten Instandsetzungsgruppe mit sich:

$$IG_j = \sum_{i=1}^n BT_i$$

**Formel 4-16: Instandsetzungsgruppe**

Jedes dieser Bauteile besitzt eine Lebensdauer  $\lambda_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , welche nach dem Verfahren in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 zu ermitteln ist. Die Lebensdauer des maßgebenden Bauteils wird mit  $t_m$  bezeichnet. Wenn für die Instandsetzungsgruppe gilt, dass

$$\lambda_m = \min(\lambda_i),$$

dann wird die Lebensdauer  $t_m$  des maßgebenden Bauteils für die gesamte Instandsetzungsgruppe  $IS_j$  festgelegt:

$$\begin{aligned} \lambda_{IS_j} &= \lambda_m \\ \lambda_i &= \lambda_m \quad i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Die Kosten für einen festgelegten Betrachtungszeitraum lassen sich über folgende Formel berechnen:

$$\sum_{i=1}^n K_i \cdot \frac{T}{\lambda_m}$$

**Formel 4-17: Kosten der Instandsetzungsgruppe für  $t_m = \min(t_i)$**

Mit

$K_i$  = Kosten des Bauteils  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$

$T$  = Betrachtungszeitraum, z.B. wirtschaftliche Nutzungsdauer

Wenn die Lebensdauer des maßgebenden Bauteils  $\lambda_m$  nicht der geringsten Lebensdauer der Bauteilgruppe entspricht, können gegebenenfalls durch eine Lebensdaueranpassung des maßgebenden Bauteils Kosten eingespart werden. Hier gilt es zwei Fälle zu unterscheiden:

Wenn gilt

$$\lambda_m = \max(\lambda_i) \text{ und}$$

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_i} < 2$$

kann das maßgebende Bauteil und somit die komplette Instandsetzungsgruppe bereits zu einem früheren Zeitpunkt instandgesetzt werden. Dieser Zeitpunkt sollte mit der Instandsetzung eines anderen Bauteils der Instandsetzungsgruppe zusammenfallen.

Werden die Lebensdauern  $t_i$  der  $n$  Bauteile der Instandsetzungsgruppe aufsteigend nach ihrer Lebensdauer geordnet und der Index bezeichnet die Ranggröße, dann gilt:

$$\max(\lambda_i) = \lambda_m = \lambda_n$$

Der Instandsetzungszeitpunkt  $\lambda_m$  des maßgebenden Bauteils kann auf einen Instandsetzungszeitpunkt  $\lambda_i$  ( $i = 1, \dots, n - 1$ ) vorverlegt werden. Dadurch wird Abnutzungsvorrat des maßgebenden Bauteils verschenkt, allerdings wird ansonsten Abnutzungsvorrat der Bauteile verschenkt, welche vor dem Zeitpunkt  $\lambda_i$  instandgesetzt wurden. In diesem Fall kommt es maßgeblich auf die Kosten der einzelnen Bauteile an. Bei günstigeren Bauteilen fallen häufigere Instandsetzungen aus monetärer Sicht nicht so sehr ins Gewicht wie bei teureren Bauteilen. Daher muss geprüft werden, zu welchem Zeitpunkt  $\lambda_i$  die Instandsetzung des maßgebenden Bauteils monetär am vorteilhaftesten ist.

Bauteile, die aufgrund der Lebensdaueranpassung des maßgebenden Bauteils, eine längere Lebensdauer als das maßgebende Bauteil aufweisen ( $\lambda_i > \lambda_m$ ), wird ebenfalls die Lebensdauer  $\lambda_m$  zugeordnet, da zum Zeitpunkt  $\lambda_m$  alle Bauteile einer Instandsetzungsgruppe erneuert werden.

Wurden die Instandsetzungszeitpunkte der einzelnen Bauteile festgesetzt, wird die Austauschrate der Bauteile berechnet. Hier ist zu beachten, dass zu der Austauschrate eines Bauteils die Austauschrate des maßgebenden Bauteils zu addieren ist und nach dem Zeitpunkt  $\lambda_m$  die Lebensdauer aller Bauteile wieder bei null beginnt.

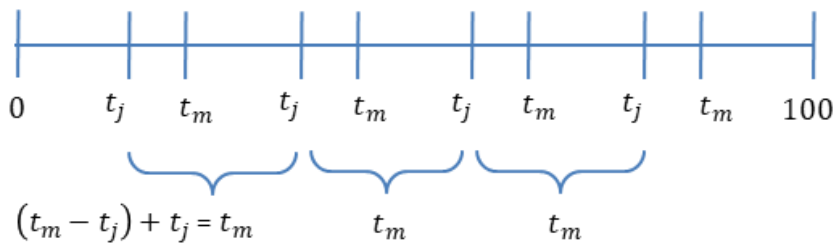


Für alle Bauteile, für die  $(\lambda_i < \lambda_m)$  gilt, lässt sich die Austauschrate wie folgt berechnen:

$$\alpha = \left( \frac{T - \lambda_i}{\lambda_m} + 1 \right) + \frac{T}{\lambda_m}$$

**Formel 4-18: Austauschrate für alle Bauteile mit  $\lambda_i < \lambda_m$**

Abbildung 4-9 zeigt die Reihenfolge der Instandsetzungen. Bauteile, die eine längere Lebensdauer als das maßgebende Bauteil haben, werden immer zum Zeitpunkt  $\lambda_m$  instandgesetzt. Bauteile mit einer kürzeren Lebensdauer werden bis zum Zeitpunkt  $\lambda_m$  einmal erneuert. Danach beginnt die Lebensdauer aller Bauteile wieder bei null. Im Zeitraum  $(T - \lambda_i)$  erfolgt die Instandsetzung des Bauteils nach der Lebensdauer  $\lambda_m$ . Daher wird die Anzahl an Instandsetzungen in diesem Zeitraum berechnet. Die erste Instandsetzung des Bauteils muss zum Schluss noch dazu addiert werden ebenso wie die Instandsetzungen des maßgebenden Bauteils zum Zeitpunkt  $\lambda_m$ , die wie erläutert die Instandsetzung der anderen Bauteile zu Folge hat.



**Abbildung 4-9: Reihenfolge von Instandsetzungszeitpunkten für  $\lambda_m = \max(\lambda_i)$**

Für das maßgebende Bauteil und alle Bauteile, für die  $(t_i > t_m)$  gilt, lässt sich die Austauschrate wie folgt berechnen:

$$\alpha = \frac{T}{\lambda_m}$$

**Formel 4-19: Austauschrate des maßgebenden Bauteils**

Wenn für die Lebensdauer des maßgebenden Bauteils gilt:

$$\frac{\lambda_m}{\lambda_i} \geq b$$

mit  $b > 2$ ,

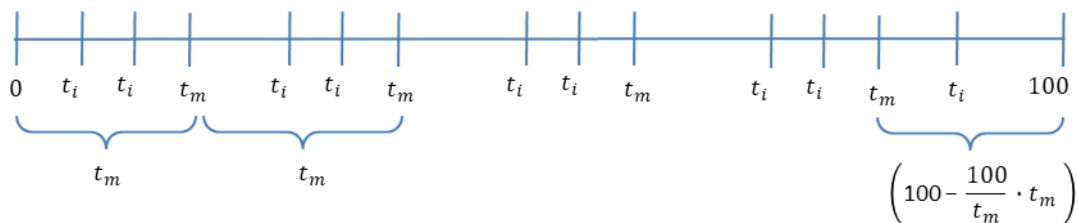
wird das Bauteil mit der Lebensdauer  $\lambda_i$  b-mal instandgesetzt, ehe das maßgebende Bauteil instandgesetzt wird.

Für diesen Fall lässt sich die Austauschrate über folgende Formel ermitteln:

$$\alpha = \left( \frac{T}{\lambda_m} \cdot b + \frac{T - \frac{T}{\lambda_m} \cdot \lambda_m}{\lambda_i} \right) + \frac{T}{\lambda_m}$$

**Formel 4-20: Austauschrate für alle Bauteile  $\frac{\lambda_m}{\lambda_i} \geq b$**

Die Reihenfolge der Instandsetzungen ist in Abbildung 4-10 dargestellt. Das Bauteil wird  $b$ -mal im Zeitraum bis zu  $\lambda_m$  instandgesetzt. Nach der letzten Instandsetzung des maßgebenden Bauteils bleibt der Zeitraum  $(T - \frac{T}{\lambda_m} \cdot \lambda_m)$  übrig. Für diesen Zeitraum muss berechnet werden, wie oft das Bauteil noch bis zum Ende der Betrachtungsdauer instandgesetzt werden muss  $(\frac{T - \frac{T}{\lambda_m} \cdot \lambda_m}{\lambda_i})$ .



**Abbildung 4-10: Reihenfolge der Instandsetzungen für  $\frac{\lambda_m}{\lambda_i} \geq b$**

Wird das maßgebende Bauteil bei der  $b$ -ten Instandsetzung eines anderen Bauteils instandgesetzt, so dass gilt:

$$\lambda_m = b t_i$$

mit  $b \geq 2$

lässt sich die Austauschrate des maßgebenden Bauteils über folgende Formel berechnen:

$$\alpha = \frac{T}{b \cdot \lambda_i} = \frac{T}{\lambda_m}$$

**Formel 4-21: Austauschrate des maßgebenden Bauteils für  $\lambda_m = b \lambda_i$**

Für die Austauschrate der anderen Bauteile der Instandsetzungsgruppe können Formel 4-18 und Formel 4-20 angewendet werden.

Tabelle 4-2 gibt einen Überblick über die hergeleiteten Formeln:

	$\lambda_m = \min(\lambda_i)$	$t_m = \max(\lambda_i)$ und $\frac{\lambda_m}{\lambda_i} < 2$	$\lambda_m = b\lambda_i$	$\frac{\lambda_m}{\lambda_i} \geq b$ mit $b > 2$
<b>Maßgebendes Bauteil</b>	$\frac{T}{\lambda_m}$	$\frac{T}{\lambda_m}$	$\frac{T}{b \cdot \lambda_i}$	$\frac{T}{\lambda_m}$
$\lambda_i > \lambda_m$	$\frac{T}{\lambda_m}$	$\frac{T}{\lambda_m}$	$\frac{T}{b \cdot \lambda_i}$	$\frac{T}{\lambda_m}$
$\lambda_i < \lambda_m$	$\frac{T}{\lambda_m}$	$\left(\frac{T - \lambda_i}{\lambda_m} + 1\right) + \frac{T}{\lambda_m}$	$\left(\frac{T}{\lambda_m} \cdot b + \frac{T - \frac{T}{\lambda_m} \cdot \lambda_m}{\lambda_i}\right)$	$\left(\frac{T}{\lambda_m} \cdot b + \frac{T - \frac{T}{\lambda_m} \cdot \lambda_m}{\lambda_i}\right) + \frac{T}{\lambda_m}$

Tabelle 4-2: Überblick der Formeln zur Berechnung der Austauschrate

Um die entstehenden Kosten zu berechnen und die verschiedenen Varianten vergleichen zu können, werden die sämtliche Bauteile, welche in der Objektstruktur (vgl. Kapitel 4.1.1) enthalten sind sowie deren Vernetzungen untereinander (vgl. Kapitel 4.2), in einer Einflussmatrix mit n Spalten und n Zeilen und den Einträgen  $a_{kj}$  dargestellt. „0“ bedeutet, die Instandsetzung des Bauteils hat keinen Einfluss auf ein anderes Bauteil. „1“ bedeutet, es ist eine Vernetzung der Bauteile vorhanden. Da bei jeder Instandsetzung das Bauteil selbst auch instandgesetzt werden muss, enthalten die Diagonalen eine „1“.

	BT 1	BT 2	BT 3	...	BT n
BT 1	1				
BT 2		1			
BT 3			1		
...					1
BT n					1

Abbildung 4-11: Einflussmatrix für alle n Bauteile

Die Matrix wird mit  $A$  bezeichnet und enthält die Einträge  $a_{kj}$ :

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2j} \\ a_{31} & a_{32} & 1 & \dots & a_{3j} \\ \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ a_{k1} & a_{k2} & a_{k3} & \dots & 1 \end{pmatrix} = a_{kj}$$

mit  $k = 1, \dots, n$  und  $j = 1, \dots, n$

Die Instandsetzungskosten für eine Instandsetzungsgruppe können über den dazugehörigen Spaltenvektor der Matrix berechnet werden. Die Einträge „1“ geben an, welche Bauteile instandgesetzt werden.

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ a_{2j} \\ \dots \\ a_{kj} \end{pmatrix}$$

Die Instandsetzungskosten ergeben sich aus der Austauschrate und den Kosten des Bauteils. Die Kosten der Bauteile  $K_n$  und die Austauschrate  $\alpha_n$  können als Vektoren geschrieben werden:

$$\vec{K} = \begin{pmatrix} K_1 \\ K_2 \\ \dots \\ K_n \end{pmatrix}$$

$$\vec{\alpha} = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \dots \\ \alpha_n \end{pmatrix}$$

Über den jeweiligen Spaltenvektor der Einflussmatrix können die zukünftigen Investitionskosten für die Instandsetzungsgruppe  $IK_{z,IG}$  berechnet werden:

$$\vec{v} \cdot \vec{\alpha} \cdot \vec{K} = IK_{z,IG}$$

**Formel 4-22: Berechnung der zukünftigen Investitionskosten**

Das Vorgehen wird an einem Beispiel erläutert. Innerhalb eines Bauwerks wird eine Instandsetzungsgruppe  $IG_j$  mit  $n = 3$  Bauteilen ausgewählt und die Gesamtnutzungsdauer als Betrachtungszeitraum auf  $T = 100$  Jahre festgelegt. Die Lebensdauern der Bauteile sind in Tabelle 4-3 dargestellt:

Bauteil	Lebensdauer $\lambda$	Kosten
Bauteil Nr. 1	10 Jahre	300.000 Euro
Bauteil Nr. 2 (maßgebendes Bauteil)	15 Jahre	100.000 Euro
Bauteil Nr. 3	27 Jahre	50.000 Euro

**Tabelle 4-3: Instandsetzungsgruppe mit n=3 Bauteilen**

Da die Lebensdauer von Bauteil Nr. 3 mit 27 Jahren größer ist als die Lebensdauer des maßgebenden Bauteils gilt:

$$\lambda_3 = \lambda_m = 15 \text{ Jahre}$$

Die Lebensdauer von Bauteil Nr. 1 ist mit 10 Jahren kleiner als die Lebensdauer des maßgebenden Bauteils. Es gilt:

$$\lambda_1 < \lambda_m; \quad \frac{\lambda_m}{\lambda_1} = 1,5 < 2,0$$

Daher lässt sich die Austauschrate für Bauteil 1 nach Formel 4-18 berechnen:

$$\alpha_1 = \left( \frac{100 - 10}{15} + 1 \right) + \frac{100}{15} = 13$$

Die Austauschrate für das maßgebende Bauteil sowie Bauteil Nr. 3 ergibt sich zu

$$\alpha_{2/3} = \frac{100}{15} = 6$$

Die Instandsetzungskosten lassen sich nach Formel 4-22 berechnen:

$$IK_{z,IG} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 300.000 \\ 100.000 \\ 50.000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 13 \\ 6 \\ 6 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 4.800.000 \text{ €}$$

Alternativ besteht die Möglichkeit, alle Bauteile zum Zeitpunkt  $\lambda_1 = 10$  instand zu setzen.

Die Austauschraten ergeben sich dann wie folgt:

$$\alpha_{1/2/3} = \frac{100}{10} = 10$$

Die Instandsetzungskosten ergeben sich zu 4,5 Mio. Euro.

$$IK_{z,IG} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 300.000 \\ 100.000 \\ 50.000 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 10 \\ 10 \\ 10 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = 4.500.000 \text{ €}$$

Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass es kostengünstiger ist, alle Bauteile dieser Instandsetzungsgruppe gemeinsam entsprechend der geringsten Lebensdauer instand zu setzen.

#### 4.4 Standardraumstrukturen für Verkehrsinfrastrukturobjekte

Nachdem in Kapitel 3.4.7 auf das Konzept von Standardraumstrukturen eingegangen wurde, erfolgt in diesem Kapitel die Methodik zur Modellentwicklung explizit für Verkehrswege, Brücken und Tunnel. Im Rahmen der Entwicklung von Standardraumstrukturen werden verschiedene Ebenen gebildet. KORNBLUM entwickelte diese Methodik für Bürogebäude und unterteilte das Bauwerk in nutzungsspezifische sowie übergeordnete Standardräume (vgl. Kapitel 3.4.7). Für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur ist eine derartige Unterteilung der Standardräume nicht sinnvoll. Nutzungsspezifische Standardräume beziehen sich auf eine bestimmte Nutzung und enthalten nur Ausbaugewerke. Bei Infrastrukturbauwerken existieren derartige „Räume“ nicht. Daher wird ein definierbarer Bereich des Bauwerks zu einem fiktiven Standardraum zusammengefasst, für welchen Kostenkennwerte und Lebensdauern hinterlegt werden. Die Bauteile des Standardraums werden durch standardisierte, ausführungorientierte Positionen beschrieben. Um eine derartige vereinfachte Darstellung ermöglichen zu können, müssen gewisse Annahmen getroffen werden.

Die Bauwerksstruktur wird anhand von 5 Ebenen definiert. Im Rahmen der Standardisierung der Objekte sind die Kostengruppen der DIN 276 nicht von Interesse. Die Struktur der Kosten eignet sich nicht, um das Objekt und dessen Bauteile sinnvoll abzubilden. Über die Kostengliederung dieser Norm hinaus können die Kosten weiter für eine differenzierte Kostenplanung nach den technischen Merkmalen des Bauwerkes oder aus Gesichtspunkten der Berufsdifferenzierenden Arbeitsteilung im Hinblick auf Vergabe und Bauausführung nach der geometrischen oder vertraglichen Projektstruktur bis auf die unterste Positionsebene untergliedert werden.<sup>381</sup> Deshalb wird eine separate Bauwerksstruktur in Anlehnung an KORNBLUM<sup>382</sup> und GREITEMANN<sup>383</sup> entwickelt.

Die erste Ebene legt den Bauwerkstyp fest. Die zweite Ebene stellt die übergeordneten Baugruppen Baukonstruktion, Ausstattung und technische Anlagen dar. Den Baugruppen werden die einzelnen Standardraumstrukturen zugeordnet, welche sich an den übergeordneten Funktionseinheiten des Objekts orientieren (vgl. Kapitel 4.1). Für einige Standardraumstrukturen ist eine weitere Unterteilung in untergeordnete Funktionseinheiten sinnvoll. Dies ist für Standardräume der Fall, die mehrere Bauteile mit unterschiedlichen Lebensdauern enthalten. Da diese Bauteile aber die gleiche Funktion erfüllen, ist es nicht zielführend, diese in einzelne Standardräume einzugliedern. Die vierte Ebene der Bauwerksstruktur umfasst die Bauteile, aus denen sich die einzelnen Standardräume zusammensetzen. Die fünfte Ebene enthält ausführungorientierte Positionen, die zur Beschreibung der Bauteile notwendig sind. Innerhalb der Standardräume werden die Kosten bis auf die unterste Positionsebene untergliedert.

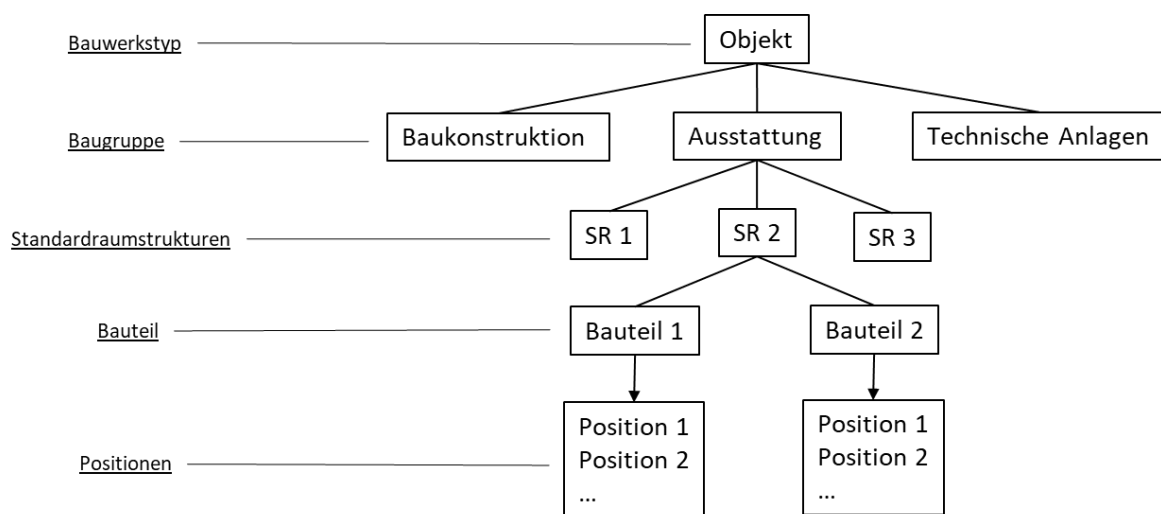


Abbildung 4-12: Allgemeines Rahmenmodell für Standardraumstrukturen<sup>384</sup>

<sup>381</sup> Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 276: 2017-07 Entwurf: Kosten im Bauwesen. Berlin 2017, S.10.

<sup>382</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2017

<sup>383</sup> Vgl. Greitemann, Peter: Bestimmung der Bauzeit von Bauprojekten zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. 2017.

<sup>384</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2017. S. 138.

Die Entwicklung von Standardraumstrukturen für Infrastrukturbauwerke setzt fundierte Kenntnisse über den Aufbau des Bauwerks voraus. Vor allem in Bezug auf die technischen Anlagen dienen Richtlinien als Grundlage für die Entwicklung der Standardraumstrukturen. Auf dieser Basis können Strukturen für jeden Standardraum festgelegt werden, die eine Mengenermittlung schon in frühen Projektphasen ohne Vorliegen einer Ausführungsplanung erlauben. Folgende einschlägige Normen und Regelwerke werden für die Genese der Standardraumstrukturen verwendet:

- Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
- Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING), Stand 12/2017
- Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten
- Arbeitsgruppe Infrastrukturmanagement, FGSV: Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO)
- Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr, FGSV: Abdichtungs- und Entwässerungssysteme bei Verkehrstunnelbauwerken
- Vorhandene Leistungsverzeichnisse aus Kapitel 5.2.1
- Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit von KUEN<sup>385</sup>, SCHMITT<sup>386</sup>, KIRCH<sup>387</sup>

#### 4.4.1 Bauwerkstyp

Die erste Ebene legt den Bauwerkstyp fest. Der Forschungsgegenstand dieser Arbeit sind die Bauwerke Verkehrswege, Brücke und Tunnel, für welche im Folgenden die Standardräume hergeleitet werden. Es ist zu beachten, dass mit der Methodik der Standardraumstrukturen prinzipiell jede Art von Gebäude bzw. Bauwerk abgebildet werden kann. Eine Anwendung bspw. auf die soziale Infrastruktur ist bei Kenntnis der notwendigen Informationen jederzeit möglich.

#### 4.4.2 Baugruppen

Die zweite Ebene unterteilt das Bauwerk in die Baugruppen Baukonstruktion, Ausstattung und Technische Anlagen, welche sich zur Findung und Herleitung der Standardräume verwenden lassen.

Unter die Baugruppe „Baukonstruktion“ fallen alle Bauteile, welche das Grundgerüst und das wesentliche Traggerüst des Bauwerks bilden. Hierunter fallen bspw. bei der Brücke die Bauteile des Unterbaus sowie der Überbau. An diesen Bauteilen werden im Laufe der Nutzungsdauer keine Veränderungen vorgenommen. Sie stellen das Äquivalent zum Rohbau beim Hochbau dar.

---

<sup>385</sup> Vgl. Kuen, Tamara: Quantifizierung von Herstellungsverfahren im Brückenbau unter besonderer Berücksichtigung deren Standardisierung hinsichtlich Kosten und Zeit. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. November 2017.

<sup>386</sup> Vgl. Schmitt, Jonas: Kostengliederung, Kostenkennwerten und Lebensdauern der technischen Anlagen von Ingenieurbauwerken. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. Juni 2018.

<sup>387</sup> Vgl. Kirch, Mirko: Instandhaltungsmanagement der technischen Anlagen im Infrastrukturbereich. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. November 2018.

Die Baugruppe Ausstattung enthält alle Bauteile, die auf oder an der Baukonstruktion angebracht werden und selbst keine tragende Funktion erfüllen. Die Bauteile, welche unter diese Baugruppe fallen, können mit geringem Aufwand ersetzt werden. Ein Eingriff in das Tragwerk ist dabei nicht nötig.

Der Baugruppe Technische Anlagen werden sämtliche Anlagen zugeordnet, die in die Kostengruppe 400 der DIN 276 fallen. Technische Anlagen müssen über die gesamte Nutzungsdauer des Bauwerks kontinuierlich betrieben und instandgehalten werden. Da die technischen Anlagen von Bauwerken oft gesondert betrachtet und ausgeschrieben werden, werden sie in einer eigenen Baugruppe zusammengefasst, um die entstehenden Kosten differenziert und auch im Hinblick auf Vergabe und Bauausführung betrachten zu können.

Abbildung 4-13 gibt einen Überblick über die vorgestellten Baugruppen:

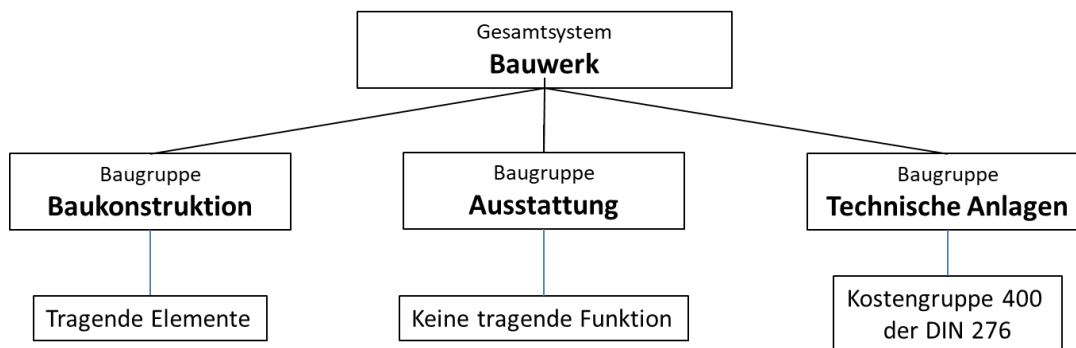


Abbildung 4-13: Darstellung der verschiedenen Baugruppen

### 4.4.3 Standardraumstrukturen

Sämtliche Standardraumstrukturen, aus denen sich das Gesamtobjekt zusammensetzt, sind in der dritten Ebene erfasst. Im Bereich des Hochbaus hat KORNBLUM Standardräume gewählt, welche reale Räume des Gebäudes darstellen wie z.B. Küche oder Bad. Die Tragstruktur mit Wänden, Dach, Fassade etc. wird durch sogenannte fiktive Standardräume abgebildet.

Reale Räume wie sie im Hochbau vorkommen, gibt es bei Infrastrukturbauwerken nicht. Daher muss eine Methodik entwickelt werden, um die einzelnen Standardräume zu definieren. Die Standardräume für Infrastrukturbauwerke werden so gebildet, dass sie einen eindeutig abgegrenzten Bereich des Bauwerks abbilden. Die Standardräume werden entsprechend der Funktionseinheiten als „funktional abgegrenzte Einheit“ definiert (vgl. Kapitel 3.1.3). Dabei sind die Standardräume der Baugruppe „Baukonstruktion“ klar geometrisch voneinander abgegrenzt. Standardräume, die unter die Baugruppe Technische Anlagen fallen, werden hinsichtlich ihrer Funktion voneinander abgegrenzt. Die Baugruppe „Ausstattung“ grenzt Standardräume hinsichtlich ihrer Funktion und geometrischen Lage voneinander ab. Beispielsweise befinden sich Kappen und Fahrbahn über der Oberkante des Überbaus und sind somit geometrisch von diesem abzugrenzen. Da Kappen und Fahrbahn unterschiedliche Funktionen erfüllen, ist es naheliegend diese nicht in einem Standardraum zusammenzufassen. Sämtliche Standardräume erhalten außerdem Positionen für die Demontage und Entsorgung der Bauteile.



Eine Implementierung von verschiedenen Ausstattungsniveaus ist für Infrastrukturbauwerke nicht zielführend. Im Bereich von Büro- oder Wohnimmobilien ist eine derartige Ebene innerhalb der Standardräume sinnvoll, da Immobilien immer einen individuellen Nutzen für den Investor mit sich bringen, der sich je nach Bauherrn stark unterscheiden kann. Um die Kostenunterschiede der verschiedenen Ausstattungsniveaus zu berücksichtigen, ist daher eine Unterscheidung nötig.<sup>388</sup> Für alle Infrastrukturbauwerke gibt es ein eindeutiges Ausstattungsniveau. Im Gegensatz zu Büro- oder Wohnimmobilien haben Infrastrukturbauwerke einen rein volkswirtschaftlichen Nutzen. Für die Realisierung von Infrastrukturbauwerken sind der neueste Stand der Technik und die Bedürfnisse der Volkswirtschaft zu berücksichtigen. Diese Anforderungen ergeben sich aus den aktuell gültigen Richtlinien und Normen, auf dessen Grundlagen die Standardraumstruktur erstellt wird. Das geforderte Ausstattungsniveau wird so gewährleistet. Eine höherwertige Ausstattung als für die Nutzung gefordert, bringt keinen Mehrwert mit sich. Es werden dennoch unterschiedliche Ausführungsmöglichkeiten eines Bauteils wie z.B. der Fahrbahn, im Rahmen der Genese der Standardraumstrukturen berücksichtigt.

#### **4.4.4 Bauteile und Positionen**

Die Bauteile einer Standardraumstruktur bilden die vierte Ebene der Bauwerksstruktur. Innerhalb einer Standardraumstruktur befinden sich alle Bauteile, die erforderlich sind, um die Funktionen der Standardräume zu erfüllen bzw. die zur Herstellung der Standardräume notwendig sind. Beispielsweise setzt sich der Standardraum „Beleuchtung“ der Bauwerktyps Tunnel aus den Bauteilen Tunnelleuchten, Leuchtenbefestigung sowie aus verschiedenen Sensoren für die Messtechnik zusammen. Um die zukünftigen Investitionskosten bestimmen zu können, müssen die Standardräume um Positionen für den Ausbau und die Entsorgung des Bauteils erweitert werden. Die Kosten für die Herstellung des neuen Elements und die Demontage des alten Elements ergeben zusammen die Instandsetzungskosten. Durch die Zuordnung von Lebensdauern zu den Bauteilen lassen sich die Zeitpunkte bestimmen, zu denen die Instandsetzungskosten entstehen.

Die einzelnen Bauteile werden durch ausführungsorientierte Positionen beschrieben. Sie stellen die kleinste Einheit des Bauwerkes dar und werden mit Kostenkennwerten belegt. Die Leistungspositionen werden mit Hilfe von Standardleistungstexten des Regionaleistungskataloges und des Standardleistungskataloges für den Straßen- und Brückenbau sowie aus verschiedenen Leistungsverzeichnissen hergeleitet. Jeder Position wird außerdem eine Bezugseinheit zugeordnet, über die ihre Mengen abgebildet werden. Die Summe aller Positionen innerhalb der Standardraumstrukturen ergibt die Herstellungskosten des Bauwerks. Die Formeln zur Berechnung der Verzehrmenen der einzelnen Positionen werden über ausgewählte Objekte sowie Literaturrecherchen deduktiv sowie induktiv bestimmt.

Die Positionen erhalten eine durchlaufende Positionsnummerierung innerhalb des Standardraums. Diese Nummer setzt sich aus den Ziffern der verschiedenen Bauwerksebenen zusammen. Die Systematik soll an einem Beispiel erläutert werden:

---

<sup>388</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Entwicklung von Standardraumstrukturen zur Kostenermittlung von Wohnimmobilien. Master's Thesis. Technische Universität München. Lehrstuhl von Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2016, S. 61.

01.05.01 Elastomerlager, fest, gem. DIN EN 1337-1 Nr. 1.6

01	Bauwerkstyp Brücke
05	Standardraum Lager
01	fortlaufende Nummerierung

#### 4.4.5 Quantifizierung der Investitionskosten

Die Herstellungskosten der einzelnen Bauteile eines Objekts ergeben sich aus dem Produkt eines Kostenkennwertes und der Verzehrmenge. Zur Berechnung der zukünftigen Investitionskosten werden die Kosten mit der Austauschrate  $\alpha$  multipliziert. Die Bezugseinheit einer Position entspricht dabei der Einheit, die in den Standardraumstrukturen festgelegt wird. Es wird für die Ermittlung der Kostenkennwerte bewusst nicht auf Angaben aus Baukostenkatalogen zurückgegriffen, da deren Ursprung und Eigenschaften im Hintergrund nicht erkennbar sind und Positionen aus einem realen Leistungsverzeichnis die Leistungen ganzheitlicher abbilden.

Sämtliche in den Standardräumen enthaltenen Positionen werden mit Kostenkennwerten belegt. Die Daten zu Kostenkennwerten sind von ausgewählten Objekten empirisch herzuleiten. Es wird für die Ermittlung der Kostenkennwerte bewusst nicht auf Angaben aus Baukostenkatalogen zurückgegriffen, da deren Ursprung und Eigenschaften im Hintergrund nicht erkennbar sind und Positionen aus einem realen Leistungsverzeichnis die Leistungen ganzheitlicher abbilden. Für die Auswertung ist eine Kostendatenbank (KDB) zu erstellen, in die die Positionen der Standardraumstruktur und die dazugehörigen Kostenkennwerte von Leistungsverzeichnissen sowie dazugehörigen Preisspiegeln eingetragen werden. Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit von SCHMITT<sup>389</sup>, KUEN<sup>390</sup>, HOFFELLER<sup>391</sup> und KATSENELSON<sup>392</sup> liefern Ansätze zur Erzeugung einer Kostendatenbank für Brücken, Verkehrswegen und Tunneln sowohl für den Neubau als auch für die Instandsetzung. Die Projekte, aus denen die Kostenkennwerte ermittelt werden, müssen in ihren Randbedingungen vergleichbar sein. Das bedeutet, dass die Kostendatenbank auf der Grundlage von einheitlichen Leistungsbeschreibungen erstellt werden muss. Je genauer die Werte sind, desto aussagekräftiger sind auch die Ergebnisse. Die Qualität der Kostenkennwerte betrifft nicht das Konzept der Standardisierung.

Nachdem sämtliche notwendige Informationen der Datensätze in die Kostendatenbank eingetragen wurden, können die Kosten gemäß der in Kapitel 4.4.5.1.1 vorgestellten Methodik ausgewertet werden. Eine beispielhafte Berechnung mit den für diese Arbeit vorliegenden

<sup>389</sup> Vgl. Schmitt, Jonas: Kostengliederung, Kostenkennwerten und Lebensdauern der technischen Anlagen von Ingenieurbauwerken. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. Juni 2018.

<sup>390</sup> Vgl. Kuen, Tamara: Quantifizierung von Herstellungsverfahren im Brückenbau unter besonderer Berücksichtigung deren Standardisierung hinsichtlich Kosten und Zeit. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. November 2017.

<sup>391</sup> Vgl. Hoffeller, Marina: Kostengliederung, Kostenkennwerte und Lebensdauern von Tunnelbauwerken. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. Dezember 2016.

<sup>392</sup> Vgl. Katsenelson, Jenya: Entwicklung einer Kostendatenbank für Straßenbrücken für die Implementierung in BIM. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. November 2021.

Datensätze erfolgt in Kapitel 7 im Rahmen der Anwendung des Modells. Die Datenbank sollte regelmäßig aktualisiert werden. Das Ziel ist, möglichst viele Informationen der vorliegenden Daten zu den Einheitspreisen (EP) von verschiedenen Bauwerken in dieser Kostendatenbank zu erfassen, so dass eine aussagekräftige statistische Analyse durchgeführt werden kann. Die Herausforderungen stellen die eingeschränkte Datenverfügbarkeit und die nur teilweise vergleichbaren Datensätze dar. Das Datenbankmodell zur Erfassung der vorhandenen Datensätze ist in Abbildung 4-14 dargestellt.

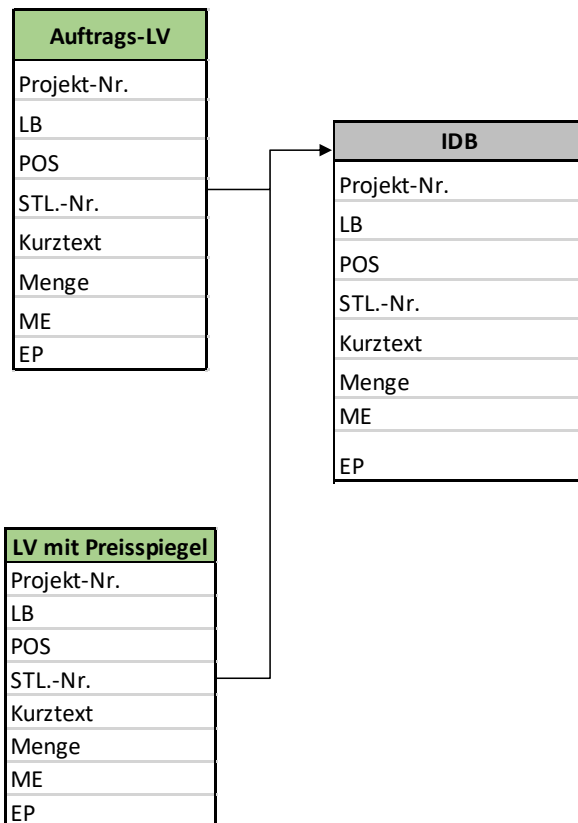


Abbildung 4-14: Datenmodell: Erfassung der vorhandenen Datensätze

Bei Bauprojekten entsprechen die Kosten für den Auftraggeber nicht den Kosten für den Auftragnehmer. Das Bauunternehmen stellt die für sie zu erwartenden Kosten (Einzelkosten der Teilleistungen zuzüglich der anteiligen Gemeinkosten der Baustelle) für die Leistungserbringung zusammen und wandelt sie im Rahmen der Angebotserstellung durch Zuschläge bestehend aus allgemeinen Geschäftskosten (AGK), Wagnis (W) und Gewinn (G) in einen wettbewerbsfähigen Preis um.<sup>393</sup> Dieser Angebotspreis und somit auch die Einheitspreise stellen in weiterer Folge die Kosten für den Auftraggeber dar. Für den Bauherrn entsprechen zu diesem Zeitpunkt die Einheitspreise den Kostenkennwerten. Diese Erläuterungen sind essenziell, um Verwechslungen auszuschließen. Das Kostenmodell dieser Arbeit soll die Kosten für den Auftraggeber ermitteln. Die Anwendung von Einheitspreisen aus Leistungsverzeichnissen findet hier seine Berechtigung, da sie die Kosten abbilden, die auf den Bauherrn zukommen.

<sup>393</sup> Vgl. Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. und Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V.: Kosten- und Leistungsrechnung der Bauunternehmen – KLR Bau, 7. aktualisierte Auflage. Wiesbaden, Berlin, Düsseldorf 2001, S.32.

Die Ermittlung der Kosten erfolgt auf Positionsebene. Jedes Bauteil wird durch eine oder mehrere ausföhrungsorientierte Leistungspositionen innerhalb der Standardräume beschrieben, für welche ein Kostenkennwert und die Verzehrmenge bestimmt werden. Die Herstellungskosten  $HK_{Position,i}$  einer Position  $i$  werden durch Multiplikation des Kostenkennwertes  $\pi_i$  mit der  $r_i$  Verzehrmenge ermittelt:

$$HK_{Position,i} = \pi_i \cdot r_i$$

**Formel 4-23: Herstellungskosten einer Position**

mit  $HK_{Position,i}$  = Herstellungskosten der Position  $i$   
 $\pi_i$  = Kostenkennwert Position  $i$   
 $r_i$  = Verzehrmenge Position  $i$

Die Herstellungskosten eines Standardraums  $HK_{SR}$  ergeben sich aus der Summe der Kosten der einzelnen Positionen.

$$HK_{SR} = \sum_{i=1}^n HK_{Position,i}$$

**Formel 4-24: Herstellungskosten eines Standardraums**

Die Summierung aller Standardräume ergibt die Gesamtkosten des Objekts  $HK_{Objekt}$ .

$$HK_{Objekt} = \sum_{i=1}^n HK_{SR,i}$$

**Formel 4-25: Herstellungskosten des Bauwerks**

Um die zukünftigen Investitionskosten während des gesamten Lebenszyklus zu erhalten, erfolgt eine Multiplikation der Herstellungskosten mit der Austauschrate  $\alpha$  des Bauteils, welche sich aus dem Quotienten der Gesamtnutzungsdauer des Objekts und der Nutzungsdauer des Bauteils ergibt (vgl. auch Formel 4-1). Zusätzlich werden noch Positionen für den Austausch bzw. die Demontage eines Bauteils vorgesehen.

$$IK_{z,Position i} = (\pi_i \cdot r_i) \cdot \alpha_i$$

**Formel 4-26: Berechnung von  $IK_z$  eines Bauteils**

mit  $\alpha$  = Austauschrate  
 $\pi_i$  = Kostenkennwert Position  $i$   
 $r_i$  = Verzehrmenge Position  $i$

Wie bei den Herstellungskosten ergeben sich die zukünftigen Investitionskosten eines Standardraums als Summer der Kosten der Positionen:

$$IK_{z,SR} = \sum_{i=1}^n IK_{z,Position\ i}$$

**Formel 4-27: Berechnung  $IK_z$  eines Standardraums**

Die Summe über alle Standardräume ergibt die zukünftigen Investitionskosten des Gesamtobjekts:

$$IK_{z,Objekt} = \sum_{i=1}^n IK_{z,SR,i}$$

**Formel 4-28: Berechnung  $IK_z$  des Objekts**

**4.4.5.1 Methodik der Untersuchung**

Für die Auswertung und Darstellung von Datenmengen existieren verschiedene Kennzahlen, die die Lage und Streuung von Daten angeben. Der Kritik an quantitativ-statischen Methoden und den daraus resultierenden Ergebnissen liegt oftmals der Vorwurf zugrunde, dass das Festhalten am standardisierten Vorgehen und die Ausrichtung nach mathematisch-statistischen Prinzipien wiederholt an der Realität vorbei zielen. Allerdings können die Auswertung und Betrachtung von zahlenmäßigen Verteilungen, Relationen und Korrelationen auch einen großen Teil zur wissenschaftlichen Arbeit beitragen und somit ein machtvoll Instrument der Auswertung bilden.<sup>394</sup>

**4.4.5.1.1 Kennzahlen der deskriptiven Statistik**

**Median**

Der Median kennzeichnet die Ausfallzeit, zu der 50 % der Bauteile ausgefallen und 50 % noch intakt sind. Er ist robust gegenüber Ausreißern bzw. Extremwerten.<sup>395</sup> Seine Definition lautet:

$$F(t_{median}) = 0,5$$

**Formel 4-29: Median**

**Arithmetisches Mittel**

Im Gegensatz zum Median ist das arithmetische Mittel durch kleine bzw. große Werte sehr leicht beeinflussbar. Es gibt den Mittelpunkt der Urliste an und lässt sich nach folgender Formel berechnen:<sup>396</sup>

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$$

**Formel 4-30: Arithmetisches Mittel**

---

<sup>394</sup> Vgl. Kuckartz, Udo; Rädiker, Stefan; Ebert, Thomas; Schehl, Julia: Statistik – Eine verständliche Einführung. 1. Auflage. Wiesbaden 2010, S.10.

<sup>395</sup> Vgl. Bortz, Jürgen; Schuster, Christof: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2010, S. 28.

<sup>396</sup> Vgl. Kuckartz, Udo; Rädiker, Stefan; Ebert, Thomas; Schehl, Julia: Statistik – Eine verständliche Einführung. 1. Auflage. Wiesbaden 2010, S.60-62.

## Varianz

Die Varianz (Streuung) ist eine Maßzahl für die Streuung der Werte um den Mittelwert  $t_m$  und gibt die mittlere Abweichung vom arithmetischen Mittelwert an. Sie ist definiert als

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - t_m)^2$$

**Formel 4-31: Varianz**

## Standardabweichung

Die Streuung der Daten wird durch eine gemittelte Abweichung vom Mittelwert gekennzeichnet. Die Standardabweichung ist gleich der positiven Quadratwurzel aus dem Mittelwert der quadrierten Abweichungen vom Mittelwert.<sup>397</sup>

$$s = \sqrt{s^2}$$

**Formel 4-32: Standardabweichung**

## Variationskoeffizient

Liegt eine Verhältnisskala vor, wird die Streuung häufig nicht absolut, sondern in Relation zum arithmetischen Mittel gemessen. Diese dimensionslose Maßzahl bezeichnet man als Variationskoeffizienten.<sup>398</sup>

Zum Vergleich der Variabilität von Verteilungen, der relativen Standardabweichung von Merkmalen mit unterschiedlichen Mittelwerten, dient der von K. Pearson (1875-1936) eingeführte Variationskoeffizient  $V$ . Dieser kennzeichnet die Standardabweichung in Einheiten des arithmetischen Mittels.<sup>399</sup>

$$V_r[\%] = \frac{s/\tilde{x}}{\sqrt{n}} \cdot 100 \text{ alle } x > 0 \text{ und } \frac{s}{\tilde{x}} \leq \sqrt{n}$$

**Formel 4-33: Variationskoeffizient<sup>400</sup>**

## Quantil

Quantile dienen als Lagemaß für komparative Merkmale. Sie definieren die Ausprägung eines Merkmales, welche einem bestimmten relativen Anteil der Verteilungsfunktion entspricht. Das Quantil stellt folglich die Umkehrfunktion der empirischen Verteilungsfunktion dar.<sup>401</sup>

---

<sup>397</sup> Vgl. Hedderich, Jürgen; Sachs, Lothar. Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg 2016, S. 92.

<sup>398</sup> Vgl. Puhani, Josef. Kleine Formelsammlung zur Statistik. Wiesbaden 2020, S. 34.

<sup>399</sup> Vgl. Hedderich, Jürgen; Sachs, Lothar. Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg 2016, S. 91.

<sup>400</sup> Vgl. Hedderich, Jürgen; Sachs, Lothar. Angewandte Statistik. Berlin, Heidelberg 2016, S. 91.

<sup>401</sup> Vgl. Kohn, Wolfgang: Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 2005, S.47.

$$x_{(p)} = F^{-1}(p) = F^{-1}\left(\min_x (F(x_{(p)}) \geq p)\right)$$

$$= F^{-1}\left(\min_x \sum_{x_j \leq x} f(x_j) \geq p\right)$$

Formel 4-34: Berechnung des p-Quantils<sup>402</sup>

Das p-Quantil beschreibt die kleinste Merkmalsausprägung  $x(p)$ , bei der die geordnete Reihe der Beobachtungswerte so unterteilt wird, dass mindestens p% der gesamten Merkmalsausprägungen erfasst werden. Typische Werte für das p-Quantil sind  $p = 0,25 / 0,50 / 0,75$  oder auch erstes, zweites und drittes Quartil genannt. Das zweite Quartil wird oftmals als Median bezeichnet.<sup>403</sup> Das erste und das zweite Quartil können nach der Formel  $x(p) = x_i = [p \cdot n]$  berechnet werden.<sup>404</sup>

**Boxplot**

Der Boxplot visualisiert den kleinsten, den größten sowie die Quartilwerte einer Häufigkeitsverteilung. Er eignet sich gut, um Vergleiche zwischen verschiedenen Verteilungen durchzuführen. Dieses Verfahren basiert auf der graphischen Darstellungsform des Box-Whisker-Plots. Es stellt mit statistischen Berechnungen Grenzen auf, ab wann ein Wert als Extremwert gilt und ist beispielhaft in Abbildung 4-15 dargestellt.

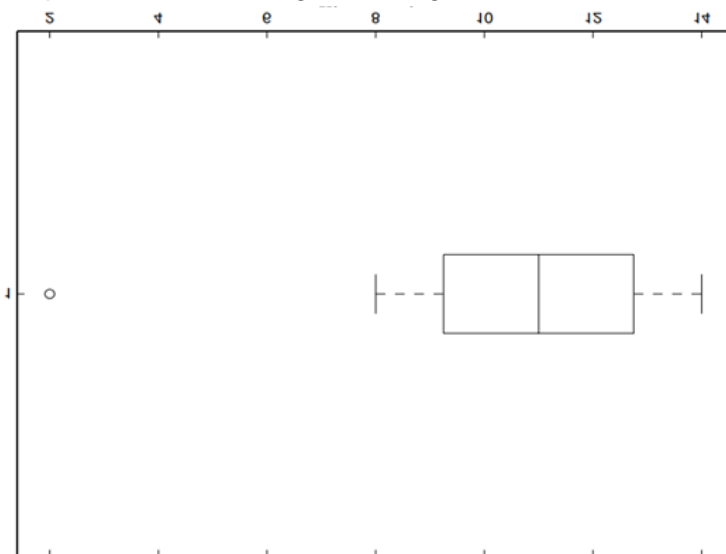


Abbildung 4-15: Darstellung einer Verteilung im Boxplot<sup>405</sup>

In einem Boxplot werden der kleinste und größte Wert sowie die Quantile einer Häufigkeitsverteilung dargestellt. Die beiden Enden der vorhandenen Box visualisieren das erste und dritte Quantil. Das zweite Quantil (Median) wird durch den Strich in der Mitte der Box dargestellt. Durch die Linien außerhalb der Box – sogenannte „Whiskers“ – werden die Werte  $x_{max}$  und  $x_{min}$  dargestellt. Die Werte außerhalb der Whiskers kennzeichnen Ausreißer.<sup>406</sup>

<sup>402</sup> Kohn, Wolfgang: Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 2005, S.47.  
<sup>403</sup> Vgl. Kohn, Wolfgang: Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 2005, S.47.  
<sup>404</sup> Vgl. Kohn, Wolfgang: Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 2005, S.48.  
<sup>405</sup> Vgl. Kohn, Wolfgang: Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 2005, S.50.  
<sup>406</sup> Vgl. Kohn, Wolfgang: Statistik – Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Berlin 2005, S.50.

#### 4.4.5.1.2 ABC- Analyse

Die ABC-Analyse ist ein Werkzeug zur Klassifizierung von Daten, um wesentliche von weniger wesentlichen Sachverhalten zu unterscheiden. Die Analyse stützt sich auf die Erkenntnis, dass eine geringe Anzahl an Artikeln zu einer hohen Funktionserfüllung beitragen. Zur Bewertung und Abgrenzung der verschiedenen Klassen, müssen geeignete Kriterien hergeleitet werden.

In der ABC-Analyse haben die Kategorien/Klassen üblicherweise folgende Bedeutung:

- Klasse A: geringer mengenmäßiger Anteil, hoher wertmäßiger Anteil. Ca. 5 % der Teile sind für ca. 60 bis 80 % der Kennzahl (z.B. Gesamtkosten) verantwortlich.
- Klasse B: mittlerer mengenmäßiger Anteil, mittlerer wertmäßiger Anteil Die Bauteile dieser Gruppe haben üblicherweise 10 bis 25 % Anteil am Gesamtwert.
- Klasse C: hoher mengenmäßiger Anteil, geringer wertmäßiger Anteil. Eine große Zahl von Bauteilen hat nur einen geringen Anteil am Gesamtergebnis. So tragen in vielen Fällen ca. 40 bis 70 % der Artikel nur zu 5 bis 15 % zum Gesamtwert bei.<sup>407</sup>

#### 4.4.5.2 Einflussfaktoren

Kostenkennwerte von Bauleistungen werden maßgeblich durch das Baujahr und den Standort des Projekts beeinflusst. Damit die Kostenkennwerte der verschiedenen Projekte vergleichbar sind und universell eingesetzt werden können, werden sie über einen Umrechnungsfaktor von Bauort und Baujahr losgelöst. Die Kostenkennwerte werden von einer Vielzahl an weiteren Faktoren beeinflusst und müssen so weit wie möglich von diesen Einflüssen losgelöst.

Um den Einfluss der Inflation auf die Kostenkennwerte zu berücksichtigen, müssen alle Preise mit Hilfe von Baupreisindizes (BPI) auf ein einheitliches Basisjahr projiziert werden. Neben dem Bau- bzw. Vergabebjahr ist auch der Standort ein entscheidender Faktor für die Einheitspreise (EP), welche durch regional unterschiedliche Preisniveaus beeinflusst werden. Um diese regionalen Unterschiede auszugleichen und somit die Vergleichbarkeit von Kostenkennwerten zu gewährleisten, werden Regionalfaktoren (RF) berücksichtigt und ebenfalls in die Kostendatenbank eingepflegt. Für die Ermittlung des Regionalfaktors ist die Postleitzahl des Bauortes zu bestimmen und auf der Online-Plattform von Sirados247 der dazugehörige Regionalfaktor abzurufen.

Der normalisierte Kostenkennwert  $\hat{\pi}_{i,j}$  für eine Position i eines Projekts j lässt sich berechnen zu

$$\hat{\pi}_{i,j} = \pi_{i,j} \cdot \left( \frac{BPI_{\text{aktuell}}}{BPI_{\text{Projekt}}} \times 100 \right) \cdot RF$$

**Formel 4-35: Berechnung des angepassten Kostenkennwerts  $\hat{\pi}_{i,j}$**

---

<sup>407</sup> Vgl. Wannenwetsch, Helmut: Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung. 5.Auflage. Berlin 2014., S. 33.



Mit:

$\hat{\pi}_{i,j}$  = normalisierter Kostenkennwert Position i Projekt j

$\pi_{i,j}$  = ursprünglicher Kostenkennwert Position i Projekt j

$RF$  = Regionalfaktor

$BPI$  = Baupreisindex

Die normalisierten Kostenkennwerte bilden den Ausgang für die statistische Analyse und die Ermittlung der Kostenkennwerte für die Standardräume.

Neben dem Baujahr sowie dem Standort des Projekts existieren noch weitere Einflussfaktoren auf die Kostenkennwerte. Diese Einflussfaktoren beziehen sich auf die verschiedenen Merkmale des Projekts und werden daher in dieser Arbeit als Merkmalsfaktoren bezeichnet. Dazu gehören bspw. die Lage und Zugänglichkeit, Größe sowie technischen Herausforderungen einer Baumaßnahme (vgl. Kapitel 3.4.5). Auf Basis der Literaturrecherche werden folgende Merkmale für die Anpassung von Kostenkennwerten in die Kostendatenbank mitaufgenommen:

- Menge der ausgeführten Position: Dieser Einfluss wird durch den Merkmalsfaktor  $MF_{Menge}$  berücksichtigt. Als repräsentative Variable dient die ausgeführte Menge einer Position.
- Größe des Bauwerks: Der Merkmalsfaktor  $MF_{Größe}$  beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Kostenkennwert einer Position und der Größe des Bauwerks. Bei Brückenbauwerken wird die Größe des Bauwerks durch die Fläche ausgedrückt. Bei Tunnelbauwerken wird die Gesamtlänge des Tunnels für die Auswertung herangezogen.
- Die technischen Anforderungen eines Bauwerks: Dieser Merkmalsfaktor wird durch die Faktoren Honorarzone Objektplanung ( $MF_{HZ\_OP}$ ) und Honorarzone Tragwerksplanung ( $MF_{HZ\_TP}$ ) berücksichtigt. Dabei dienen als repräsentative Variablen die Honorarzone für die Bestimmung des Schwierigkeitsgrades der Tragwerks- bzw. der Objektplanung.
- Wiederholungsfaktor: Es wird ein Merkmalsfaktor  $MF_{WF}$  definiert, welcher berücksichtigt, ob mehrere Bauwerke in einem Auftrag zusammen vergeben werden und damit ein Einfluss auf die Kosten entsteht. Als Variable dient die Anzahl der zusammen ausgeschriebenen Bauwerke.
- Straßenkategorie: Der Zusammenhang zwischen den Kostenkennwerten und der Straßenkategorie wird mithilfe des Lagefaktors  $MF_{Lage}$  beschrieben.

Die Kostendatenbank aus Abbildung 4-14 wird um Informationen zu diesen Einflussfaktoren erweitert. Beispielsweise müssen die Mengeninformatoren der Bauwerke für die Bestimmung des Merkmalsfaktors  $MF_{Menge}$  implementiert werden. Das erweiterte Datenmodell ist in Abbildung 4-16 dargestellt.

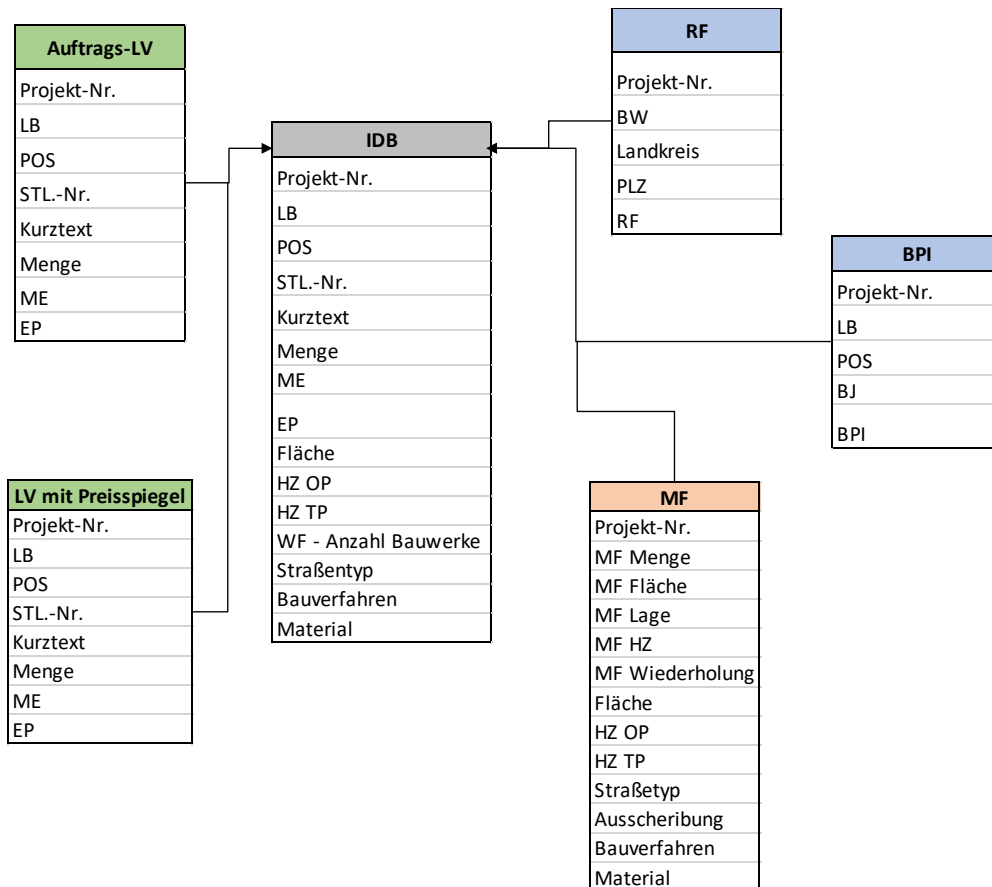


Abbildung 4-16: Erweitertes Datenbankmodell

#### 4.4.5.3 Fazit

Die Darstellung der Auswertung der für diese Arbeit vorliegenden Daten erfolgt in Kapitel 7.3 anhand des Medians, des Boxplots, der Standardabweichung und des Variationskoeffizienten. Die Vorgehensweise wird dadurch begründet, dass der Median robust gegenüber Ausreißern ist. Um Extremwerte sowohl nach oben als auch nach unten zu identifizieren, wird das von John W. Tukey entwickelte explorative Datenanalyseverfahren angewendet. Die identifizierten Extremwerte werden bei der Ermittlung der Kostenkennwerte ausgeschlossen.

Mithilfe der ABC- Analysen kann eine große Anzahl von Daten (Positionen und Preise) anhand vorgegebener Kriterien (Anteil an Gesamtkosten) in unterschiedliche Klassen unterteilt und analysiert werden. Die ABC-Analyse referenziert zwischen kostenrelevanten und kostenneutralen Positionen. Mit Hilfe des Variationskoeffizienten werden Positionen nach dem Risiko bei der Ermittlung des Erwartungswertes kategorisiert. Unter Risiko wird sowohl die positive als auch die negative Abweichung vom Erwartungswert verstanden. Zur Darstellung des Risikos wird die Varianz verwendet. Es kann auch vereinfachend die Standardabweichung angegeben werden. Auch sie beschreibt dann, in welchem Maß die beobachteten Werte vom Erwartungswert abweichen sowohl nach unten als auch nach oben.<sup>408</sup> Obgleich des geringen Datenbestandes wurde sich bewusst für eine stochastische Darstellung der ausgewerteten Daten

<sup>408</sup> Vgl. Der Präsident des Bundesrechnungshofes, „Gutachten des Bundesbeauftragten für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung über das Kostenmanagement im Bundesfernstraßenbau“. Bonn 2014. S. 33.

entschieden. Auch bei kleinen Strichproben ( $n < 30$ ) dienen die Auswertungen als Ausgangspunkt zu weiterer Forschung mit größeren Datenmengen.

#### **4.4.6 Skalierung der Standardräume**

Die Skalierung der Standardräume erfolgt nicht über eine einfache Skalarmultiplikation. In diesem Fall würde jede Position über dieselbe Bezugsgröße skaliert werden. Beispielsweise würde sich bei einer Einfeldbrücke bei einer Verdopplung der Brückenfläche die doppelte Anzahl an Fahrbahnübergänge ergeben. Eine Einfeldbrücke hat immer pro Widerlager nur einen Fahrbahnübergang, unabhängig von der Länge bzw. Breite der Brücke.

Um diese Fehler in der Berechnung der Mengen und somit der Kosten zu vermeiden, erfolgt eine mehrdimensionale Skalierung. Jede Position eines Standardraums wird für die Mengenermittlung – wie bereits beschrieben – mit einer eigenen Bezugsgröße belegt. Da die hier entwickelten Standardräume keine realen Räume mit den Abmessungen Länge, Breite und Höhe darstellen, müssen andere geeignete Bezugsgrößen ermittelt werden. Diese Bezugsgrößen können bspw. die Länge des Bauwerks oder der Querschnitt sein. Diese stellen die Objekteigenschaften dar. Außerdem werden dimensionslose Einheiten verwendet. Hierunter fallen Bauteile, deren Anzahl in [Stück] angegeben werden, wie bspw. Ventilatoren, Lager oder Entwässerungsschächte.

### **4.5 Grenzen und Annahmen innerhalb des Modells**

Das Modell gibt ein strukturiertes Vorgehen vor, um die Herstellungskosten und zukünftigen Investitionskosten von Verkehrsinfrastrukturbauwerken zu ermitteln. Das Modell bezieht sich auf Maßnahmen der Ersatzinstandsetzung, kann aber durch Anpassen der Daten auch für weitere Bereiche wie bspw. Erweiterung oder Ersatzneubau angewendet werden. Die implementierten Eingangsgrößen wie Kostenkennwerte und Lebensdauern können verändert flexibel angepasst werden.

Die in das Modell implementierten Daten zu Kostenkennwerte und Mengen stellen eine erste Grundlage zur Quantifizierung der zukünftigen Investitionskosten dar. Mangels der hinreichenden Datenlage zu Kosten für Demontage und Entsorgung von zu erneuernden Bauteilen, können für diese Bereiche keine qualifizierten Aussagen gemacht werden. Die Ermittlung der Kosten für Trag- und Arbeitsgerüste sind ebenfalls aufgrund der mangelnden Datenlänge mit Vorsicht zu genießen.

Aufgrund der nicht hinreichenden Datenlage zu den Lebensdauern der einzelnen Bauteile konnte hier keine qualifizierte Auswertung erfolgen. Es sind lediglich Lebensdauern aus der Literatur vorhanden, welche sich stark voneinander unterscheiden (vgl. Kapitel 3.3.2.5). Diese können als erste Anhaltswerte jedoch herangezogen werden. Daher werden im Modell Platzhalter hinterlegt. Konkrete Abnutzungsverläufe können in Kapitel 5 im Rahmen der Modellentwicklung nicht bestimmt werden.

Es wurde ein Verfahren aufgezeigt, wie die Daten für eine Lebensdauerbewertung zu sammeln sind. Dieses Verfahren gibt eine Gliederung der Einflussfaktoren vor und sollte mit der Zeit fortlaufend aktualisiert werden, sobald genauere Erkenntnisse vor allem in Bezug auf die Gewichtung der einzelnen Faktoren vorhanden sind.

Die Methodik der Standardraumstrukturen bildet ein Gebäude bzw. ein Bauwerk anhand einer Vielzahl von Objekten ab und dient der Kostenermittlung in frühen Projektphasen. Diese Objekte betreffen die Baukonstruktion sowie die Technischen Anlagen und stellen das Objekt als Summe seiner einzelnen Standardräume dar. Um die Methodik anzuwenden, müssen gewisse Grundannahmen getroffen werden, da in frühen Projektphasen oft noch keine detaillierte Planung vorhanden ist und die Mengen somit auch noch nicht exakt bekannt sind. Objekteigenschaften wie Länge des Bauwerks, Querschnitt oder Bauweise müssen dagegen bekannt sein.

Die Anwendung dieses Modells erfolgt parallel zur Vorplanung. In dieser Projektphase sind meist erst grundlegende Bauteilabmessungen bekannt. Einige Positionen beziehen sich jedoch auf detailliertere Maße, was zu einer Vielzahl an Angaben führen würde, welche zu diesem Zeitpunkt ohnehin noch nicht exakt bekannt sind. In diesen Fällen werden vereinfachende Annahmen getroffen, wodurch die Bezugsgrößen abgeschätzt und mit einer geringeren Anzahl an Angaben abgebildet werden können. So wird der Informationsbedarf so gering wie möglich gehalten, ohne dabei an Genauigkeit zu verlieren.

Die Definition der Ausführungsstandards und der dazugehörigen Bezugsgrößen werden in Kapitel 5 vorgenommen und die getroffenen Annahmen im Detail erläutert.

## **5 Modellentwicklung zur Bestimmung der Investitionskosten über die Gesamtnutzungsdauer**

In diesem Kapitel erfolgt die Anwendung der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik. Die untersuchten Bauwerkstypen werden für eine Ermittlung der Herstellungskosten und zukünftigen Investitionskosten in Bauteile strukturiert. Diese Strukturierung enthält sämtliche Bauteile, die für die Berechnung von Bedeutung sind. Sie bildet die Grundlage für die Erstellung der Standardraumstrukturen. Für eine bauteilbezogene Instandsetzung werden Instandsetzungsgruppen gebildet, welche ein maßgebendes Bauteil enthalten. Im zweiten Teil des Kapitels erfolgt die Genese der Standardraumstrukturen. Nachdem die Standardräume auf Basis der einschlägigen Normen und Regelwerke erstellt wurden, können diesen Kostenkennwerte und Lebensdauern zugeordnet werden.

### **5.1 Strukturierung von Objekten**

#### **5.1.1 Verkehrswege**

##### **5.1.1.1 Bauwerksstruktur**

Verkehrswege lassen sich in Straßenverkehrswege und Schienenwege unterteilen. Für den Straßenverkehr können die in Kapitel 4.1 in Abbildung 4-1 dargestellten Richtlinien und Regelwerke zur Strukturierung in Funktionseinheiten  $FE_k$  herangezogen werden. Für den Straßenverkehr sind die Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus (RStO) sowie die Arbeit von ZIEGEL relevant. Die RStO gibt folgende Funktionseinheiten von Straßen an:

- Deckschicht
- Tragschicht
- Untergrund
- Planum
- Unterbau

ZIEGEL definierte insgesamt 12 Funktionseinheiten, welche für die Herstellung und Erhaltung von Straßenverkehrswagen relevant sind:

Nr.	Funktionseinheit
1	Unterbau
2	Landschaftsbauarbeiten
3	Entwässerung
4	Deckschicht
5	Tragschicht
6	Lärmschutzkonstruktionen
7	Zäune, Holzgeländer
8	Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen
9	Verkehrsschilder
10	Fahrbahnmarkierungen
11	Lichtsignalanlagen
12	Straßenbeleuchtung

**Tabelle 5-1: Funktionseinheiten einer Straße nach ZIEGEL<sup>409</sup>**

Die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten der Deckschicht gehen mit unterschiedlichen Kosten und Lebensdauern einher, weshalb diese Funktionseinheit weiter unterteilt werden muss. Gleiches gilt für die Funktionseinheit der Tragschicht. Aufgrund der zahlreichen Ausführungsmöglichkeiten der Tragschichten werden diese in der nachfolgenden Übersicht in Tragschichten mit und ohne Bindemittel unterteilt. Im Rahmen der Erstellung der Standardraumstrukturen werden weitere Ausführungsmöglichkeiten der Tragschichten hergeleitet.

Auf der Basis der vorgestellten Gliederungen wird das Bauwerk „Straße“ in dieser Arbeit in folgende Funktionseinheiten und Bauteile gegliedert:

Baugruppe	Funktionseinheit	Bauteil
Baukonstruktion	Oberbau	Deckschicht aus Beton
		Deckschicht aus Asphalt
		Deckschicht aus Pflasterdecke
		Tragschicht mit Bindemittel
		Tragschicht ohne Bindemittel
	Planum	-
Ausstattung	Unterbau	-
	Untergrund	-
	Fahrbahnmarkierung	Fahrbahnmarkierung
Technische Anlagen	Entwässerung	Straßenabläufe
		Rohre

**Tabelle 5-2: Bauteile einer Straße**

Im Bereich der Schienenwege haben Eisenbahnunternehmen innerbetriebliche Regelwerke erlassen. Die Richtlinienfamilie 820.0000 „Grundlagen des Oberbaus“ regelt alle technischen Bestimmungen rund um den Oberbau. Sie enthält die grundsätzlichen Bestimmungen. Diese Regelwerke sind nicht frei abrufbar und konnten daher im Rahmen der Arbeit nicht für eine Strukturierung herangezogen werden. Für die Strukturierung wurde daher auf verschiedene Literaturwerke zurückgegriffen, welche Tabelle 5-3 entnommen werden können:

<sup>409</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 131-132.

Quellen zur Strukturierung von Schienenwegen	
Haldor E., Joachim; Lademann, Frank: Planung von Bahnanlagen: Grundlagen – Planung – Berechnung. 2. Auflage. München 2018.	Gertz, Carsten: Verkehrsplanung, Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen. 3. Auflage. Wiesbaden 2021.
Fendrich, Lothar; Fengler, Wolfgang: Handbuch Eisenbahninfrastruktur. 3. Überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin 2019.	Menius, Reinhard; Matthews, Volker: Bahnbau und Bahninfrastruktur. 10. Auflage. Wiesbaden 2020.
Schiemann, Wolfgang: Schienenverkehrstechnik. August 2002. 1 Auflage. Wiesbaden 2002.	

Tabelle 5-3: Quellen zur Strukturierung von Schienenwegen

Auf Basis dieser Literatur werden Schienenwege wie folgt strukturiert:

Baugruppe	Funktionseinheit	Bauteil
Baukonstruktion	Oberbau - Schotterfahrbahn	Schiene
		Schienenbefestigungen
		Schwelle
		Schotterbettung
		Planumsschutzschicht
	Oberbau – Feste Fahrbahn	Schiene
		Schienenbefestigung
		Schwelle
		Betontragschicht/ Asphalttragschicht
		Hydraulisch gebundene Tragschicht
	Frostschutzschicht	
	Unterbau	
Ausstattung	Weichen	
	Sperrren	
Technische Anlagen	Entwässerung	
	Zugsicherung	
	Signale	
	Stellwerk	
	Blockeinrichtungen	
	Oberleitungsanlage	
	Fernmelde- und informationstechnische Anlagen	

Tabelle 5-4: Bauteile von Schienenwegen

### 5.1.1.2 Instandsetzungsgruppen

Die hergeleitete Bauwerksstruktur stellt die Grundlage für die Bildung von Instandsetzungsgruppen für Verkehrswege nach der in Kapitel 4.2 vorgestellten Methodik dar.

In Abbildung 5-1 sind die Abhängigkeiten der instandsetzungsrelevanten Bauteile  $BT_{ir}$  von Straßenverkehrswegen dargestellt. Der Untergrund wird bei der Bildung von Instandsetzungsgruppen nicht berücksichtigt, da hier von einer unendlichen Lebensdauer ausgegangen wird.

Fahrbahnbereich	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abkürzung (...)						
Deckschicht	x		x			x
Tragschicht	x			x		x
Planum	x			x	x	
Unterbau	x			x	x	
Fahrbahnmarkierungen	x		x		x	
Straßenabläufe		x	x		x	
Entwässerungsrohre	x			x		x

Abbildung 5-1: Analyse der physischen Abhängigkeiten eines Straßenverkehrswegs

Mit Hilfe der Erkenntnisse aus Abbildung 5-1 werden Instandsetzungsgruppen gebildet. Bauteile im Bereich von Straßenverkehrswegen, die ohne jede Verbindung zu einem anderen Bauteil instandgesetzt werden können, sind Straßenabläufe sowie Fahrbahnmarkierungen. Bei einer Erneuerung der Deckschicht wird die Fahrbahnmarkierung zerstört und muss ebenfalls erneuert werden. Da die Entwässerungsrohre unterhalb der Deckschicht verlaufen, muss diese bei einer Erneuerung der Rohrleitungen mit erneuert werden. Für die Bildung von Instandsetzungsgruppen ist das Material der Deck- und Tragschicht nicht relevant, da ausschließlich die Lage des Bauteils entscheidend ist, nicht aber das Material. Aus diesem Grund werden in der nachfolgenden Tabelle die Deckschicht und die Tragschicht nicht weiter unterteilt. Die gebildeten Instandsetzungsgruppen mit dem jeweils maßgebenden Bauteil sind in Tabelle 5-5 dargestellt.

Maßgebendes Bauteil	Instandsetzungsgruppe	Bauteile
Deckschicht	IG 1	Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
Tragschicht	IG 2	Tragschicht
		Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
		Entwässerungsrohre
Entwässerungsrohre	IG 3	Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
		Straßenabläufe
Planum	IG 5	Planum
		Tragschicht
		Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
Unterbau	IG 6	Unterbau
		Planum
		Tragschicht
		Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
Fahrbahnmarkierungen	IG 7	Fahrbahnmarkierungen

Tabelle 5-5: Instandsetzungsgruppen für Straßenverkehrswege

Die identifizierten Abhängigkeiten der Bauteile untereinander können in einer Einflussmatrix dargestellt werden. Diese ist für Straßenverkehrswege in Abbildung 5-2 dargestellt.



auf Einfluss von	Deckschicht	Tragschicht	Entwässerungsrohre	Stößenabläufe	Planum	Fahrbahnmarkierungen
Deckschicht	1	1	1	0	1	0
Tragschicht	0	1	1	0	1	0
Entwässerungsrohre	0	0	1	0	0	0
Stößenabläufe	0	0	1	1	1	0
Planum	0	0	0	0	1	0
Fahrbahnmarkierungen	1	1	1	0	1	1

Abbildung 5-2: Einflussmatrix für Verkehrswege

## 5.1.2 Brückenbauwerke

### 5.1.2.1 Bauwerksstruktur

Ein Brückenbauwerk kann auf der Grundlage der in Kapitel 4.1 in Abbildung 4-1 aufgezeigten Quellen in Funktionseinheiten strukturiert werden. Eine Unterteilung nehmen die Anweisung Straßeninformationsbank für Ingenieurbauten (ASB-ING) sowie ZIEGEL vor.

Die ASB-ING enthält folgende relevante Bereiche für ein Brückenbauwerk:

- Überbau
- Unterbau
- Vorspannung
- Gründung
- Lager
- Fahrbahnübergänge
- Abdichtungen
- Beläge
- Kappen
- Schutzeinrichtung
- Sonstiges<sup>410</sup>

<sup>410</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (Hrsg.): RI-EBW-PRÜF 2017 – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. S. 7.

ZIEGEL definierte für Brückenbauwerke folgende Funktionseinheiten:

Nr.	Funktionseinheit
1	Gründung
2	Widerlager
3	Stützen u. Pfeiler
4	Überbau
5	Lager
6	Übergänge
7	Geländer
8	Kappen
9	Fahrbahn
10	Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen
11	Verkehrsschilder
12	Fahrbahnmarkierungen
13	Lärmschutzkonstruktionen
14	Lichtsignalanlagen
15	Straßenbeleuchtung
16	Vogeleinflugschutz
17	Entwässerung Fahrbahn
18	Entwässerung Bauwerk
19	Landschaftsbauarbeiten

Tabelle 5-6: Funktionseinheiten nach ZIEGEL<sup>411</sup>

Diese Strukturierung deckt sich in einigen Punkten mit der Strukturierung der ASB-ING. Da diese Quellen Bauteile entsprechend ihrer Funktion gliedern und nicht nach ihrem Gewerk, wie dies beim Standardleistungskatalog der Fall ist, können diese Strukturierungen für die Bildung von Funktionseinheiten herangezogen werden.

Die Unterbauten (Widerlager, Pfeiler, Gründungen) sind im Rahmen dieses Modells für die Instandsetzung nicht von Relevanz, da sie während der Nutzung nicht ausgetauscht werden.

Beim Überbau werden für die Instandsetzungsplanung Betoninstandsetzungsmaßnahmen berücksichtigt. Der komplette Austausch des Überbaus sowie der Unterbauten erfolgt am Ende des Lebenszyklus nach Ablauf der Gesamtnutzungsdauer. Für die übrigen instandsetzungsrelevanten Bauteile  $BT_{ir}$ , deren technische Lebensdauer geringer als die Gesamtnutzungsdauer ist, erfolgt im Rahmen dieses Modells ein kompletter Austausch des Bauteils, d.h. nach der Instandsetzungsmaßnahme beträgt der Abnutzungsvorrat des Bauteils wieder 100 %.

Aufgrund des Vorkommens der Brückenbauweisen in Deutschland werden nur die häufigsten Bauweisen berücksichtigt bzw. die am häufigsten vorkommenden Materialien. Brücken wie bspw. Hängebrücken oder Schrägseilbrücken werden nicht berücksichtigt, da diese Ausnahmen im deutschen Bestand darstellen. Überbauten aus Stahl- bzw. Spannbeton machen über 85 % des Brückenbestandes in Deutschland aus, weshalb Brücken aus diesen beiden Materialien berücksichtigt werden.<sup>412</sup>

<sup>411</sup> Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 133.

<sup>412</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.): Brückenstatistik 2021. Internetquelle.

Auf Basis dieser Annahmen werden Brückenbauwerke für die Berechnung der Investitionskosten in folgende Funktionseinheiten gegliedert:

Baugruppe	Funktionseinheit
Baukonstruktion	Gründung
	Unterbau
	Überbau
Ausstattung	Schutzeinrichtungen inkl. Gelände
	Lärmschutzkonstruktionen
	Fahrbahn
	Abdichtung
	Fahrbahnübergänge
	Kappen
	Lager
Technische Anlagen	Entwässerung Fahrbahn
	Entwässerung Bauwerk

**Tabelle 5-7: Gliederung eines Brückenbauwerks in Funktionseinheiten**

Die weitere Unterteilung der Funktionseinheiten in Bauteile zeigt Tabelle 5-8:

Baugruppe	Funktionseinheit	Bauteil
Baukonstruktion	Gründung	Flachgründung Fundament
		Tiefgründung Pfahlkopfplatte
		Tiefgründung Pfähle
	Unterbau	Widerlager
		Pfeiler
	Überbau	Überbau
Ausstattung	Schutzeinrichtungen inkl. Geländer	Schutzeinrichtung aus Stahlschutzplanken
		Stahlgeländer
		Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen
	Lärmschutzkonstruktionen	Lärmschutzkonstruktionen
	Fahrbahn	Deckschicht
		Schutzschicht
		Entwässerungsrinne
	Abdichtung	Dichtungsschicht
	Fahrbahnübergänge	Fahrbahnübergänge
	Kappen	Kappen
	Lager	Lager
Technische Anlagen	Entwässerung Fahrbahn	Längsleitung
		Brückenablauf
		Querleitung
		Tropftüllen
	Entwässerung Bauwerk	Falleleitungen

Tabelle 5-8: Gliederung eines Brückenbauwerks in Bauteile

Eine Beschreibung der einzelnen Funktionseinheiten und deren Bauteile erfolgt in Kapitel 5.2 im Rahmen der Definition der Standardräume.

### 5.1.2.2 Instandsetzungsgruppen

Die Instandsetzungsgruppen ergeben sich nach den in Kapitel 4.2 vorgestellten Kriterien. Die Unterbauten und der Überbau werden nicht explizit im Hinblick auf Abhängigkeiten untersucht, da diesen Bauteilen eine unendliche Lebensdauer zugeordnet wird. Bei einem Abbruch des Überbaus müssen sämtliche auf ihm montierten Bauteile ebenfalls abgebrochen werden. Werden auch die Unterbauten - bestehend aus Pfeiler/ Stützen und Widerlager und ggf. Fundamente - abgebrochen, handelt es sich um einen Ersatzneubau mit Abbruch der kompletten Bauwerksstruktur. Abbildung 5-3 bis Abbildung 5-5 stellen die identifizierten Abhängigkeiten dar. Zur besseren Übersichtlichkeit wurde eine Unterteilung in Fahrbahnbereich, Kappenbereich und Sonstiges vorgenommen.

Fahrbahnbereich	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abkürzung (...)	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Deckschicht	x		x		x	
Schutzschicht	x			x		x
Abdichtung	x			x		x
entwässerungsschacht		x	x		x	
Rohrleitung Längsentwässerung	x			x		x
Brückenablauf		x	x		x	
Querleitung	x			x		x
Tropftüllen		x	x		x	
Falleitungen		x	x		x	

Abbildung 5-3: Analyse der physischen Abhängigkeiten einer Brücke im Fahrbahnbereich

Kappenbereich	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abkürzung (...)	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Kappe	x		x			x
Schutzeinrichtungen		x	x		x	

Abbildung 5-4: Analyse der physischen Abhängigkeiten einer Brücke im Kappenbereich

Sonstiges	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abkürzung (...)	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Lager		x	x		x	
Fahrbahnübergang		x	x		x	

Abbildung 5-5: Analyse der physischen Abhängigkeiten einer Brücke für sonstige Bauteile

Auf Basis der identifizierten Verbindungen können folgende Instandsetzungsgruppen gebildet werden:

Maßgebendes Bauteil	Instandsetzungsgruppe	Bauteile
Kappe	IG 1	Kappe
		Schutzeinrichtungen
		Lärmschutzkonstruktionen
Schutzschicht	IG 2	Schutzschicht
		Deckschicht
Abdichtung	IG 3	Abdichtung
		Fahrbahn-Deckschicht
		Fahrbahn-Schutzschicht
Entwässerung Fahrbahn	IG 4	Deckschicht
Entwässerung Bauwerk	IG 5	-
Lager	IG 6	-
Fahrbahnübergänge	IG 7	-
Überbau	IG 8	-

Tabelle 5-9: Bildung von Instandsetzungsgruppen für Brückenbauwerke

Die Instandsetzungsgruppe „Kappe“ beinhaltet alle Bauteile, die bei einer Instandsetzung der Kappe ebenfalls das Ende ihrer Nutzungsdauer erreicht haben. Hierzu zählen sämtliche auf der Kappe montierten Einrichtungen.

Die Deckschicht des Fahrbahnbelags kann unabhängig von anderen Bauteilen auf der Brücke erneuert werden. Hierfür ist kein Abbruch eines weiteren Bauteils notwendig, da gemäß der ZTV- Ing die Instandsetzung der Deckschicht nicht die Erneuerung der Abdichtung voraussetzt.<sup>413</sup>

Ist die Abdichtung unter der Schutzschicht beschädigt und muss diese erneuert werden, hat dies zwangsläufig auch eine Erneuerung der Fahrbahn, bestehend aus Schutzschicht und Deckschicht, zur Folge. Bei schadhafter Abdichtung können somit die Deckschicht und Schutzschicht sowie die Abdichtung zu einer Instandsetzungsgruppe („IS Abdichtung“) zusammengefasst werden. Zwar verläuft unterhalb der Kappen die Abdichtung weiter, diese ist jedoch so an die Abdichtung unter der Fahrbahn anzuschließen, dass eine Erneuerung des Belags ohne Abbruch der Kappen erfolgen kann.<sup>414</sup>

Die ZTV-Ing Teil 8 gibt vor, Längs- und Fallleitungen der Entwässerung frei zu verlegen, da diese zur Wartung und Kontrolle frei zugänglich sein müssen. Querleitungen dagegen können in den Querschnitt einbetoniert werden. Daher kann eine Erneuerung von Längs- und Fallleitungen unabhängig von anderen Bauteilen erfolgen. Zu Erneuerung der in den Querschnitt einbetonierten Leitungen (Fahrbahnentwässerung) muss daher die Deckschicht erneuert werden (Instandsetzungsgruppe „Entwässerung Fahrbahn“).

Sind Lager beschädigt, kann es je nach Schadensart und Lagerart durch Zwängungen zu Überbauschäden kommen und dadurch zu Folgeschäden in Unterbauten.<sup>415</sup> Für den Austausch eines Lagers wird der Überbau mit Hilfe von hydraulischen Pressen angehoben und das Lager gewechselt. Der Austausch eines Lagers beeinflusst daher keine weiteren Bauteile.

Der Austausch von Fahrbahnübergängen erfolgt ebenfalls unabhängig von anderen Bauteilen.

Die dazugehörige Einflussmatrix basierend auf den Instandsetzungsgruppen ist in Abbildung 5-6 dargestellt:

---

<sup>413</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 7 Brückenbeläge. Abschnitt 1. Köln 2003, S. 7.

<sup>414</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 7 Brückenbeläge. Abschnitt 1. Köln 2003, S. 7.

<sup>415</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.319/1999/HRB „Ermittlung des Eingreifzeitpunktes für Erhaltungsmaßnahmen an Brücken- und Ingenieurbauwerken“. Bergisch Gladbach 2001. S. 24.

	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Entwässerung	Kappen	SE	Lager	FÜ
Deckschicht	1	1	1	1	0	0	0	0
Schutzschicht	0	1	1	0	0	0	0	0
Abdichtung	0	0	1	0	0	0	0	0
Entwässerung	0	0	0	1	0	0	0	0
Kappen	0	0	0	0	1	0	0	0
SE	0	0	0	0	1	1	0	0
Lager	0	0	0	0	0	0	1	0
FÜ	0	0	0	0	0	0	0	1

Abbildung 5-6: Einflussmatrix physische Abhängigkeiten für Brückenbauwerke

### 5.1.3 Tunnel

#### 5.1.3.1 Bauwerksstruktur

Das Tragsystem eines Tunnels bestehend aus der Sicherung (geschlossene Bauweise) bzw. dem Rahmentragwerk (offene Bauweise) bleibt bis zum Ende der Gesamtnutzungsdauer bestehen. Die Ausbauelemente wie z.B. Fahrbahn, Kappen sowie die gesamte technische Betriebsausstattung werden während der Gesamtnutzungsdauer entsprechend ihren technischen Lebensdauern ausgetauscht, so dass für jedes Bauteil nach der Instandsetzung der Abnutzungsvorrat auf 100 % angehoben wird.

Auf oberster Ebene lässt sich ein Tunnel in zwei Gruppen untergliedern. Zum einen in das Bauwerk und zum anderen in die technische Betriebsausstattung. Diese zwei Gruppen können dann jeweils in weitere Funktionseinheiten untergliedert werden. Die ASB-ING und ZIEGEL geben folgende Strukturierungen vor:

Nr.	ZIEGEL <sup>416</sup>	ASB-ING <sup>417</sup>
1	Außenschale	Bauwerk (Hauptbauteile)
2	Dichtung	Gründung
3	Innenschale	Abdichtungen
4	Auffüllung	Erd- und Felsanker
5	Fahrbahn	Kappen
6	Fahrbahnmarkierungen	Schutzeinrichtung
7	Verkehrsschilder	Sonstiges (andere Konstruktionsbauteile)
8	Anprallwand	
9	Kappen/ Gehwege	
10	Baulicher Brandschutz	
11	Schutz- und Rettungstüren	
12	Entwässerung	
13	Beleuchtung	
14	Lüftung	
15	Lichtsignalanlagen	
16	Kommunikation	
17	Videoüberwachung	
18	BMA	
19	Löscheinrichtungen	

**Tabelle 5-10: Strukturierung eines Tunnels nach ZIEGEL und ASB-Ing**

Die Gliederung der ASB-ING für Tunnelbauwerke berücksichtigt nicht die technische Ausstattung eines Tunnels. Für die technische Ausstattung eines Tunnels existiert eine gesonderte Richtlinie (vgl. Kapitel 3.2.3), welche eine Untergliederung in folgende 12 Funktionseinheiten enthält:

- Beleuchtungsanlagen
- Verkehrsanlagen
- Lüftungsanlagen
- Brandmeldeanlagen
- Feuerlöschanlagen, Orientierungsbeleuchtung und Fluchtwegkennzeichnung
- Videoanlage
- Lautsprecheranlage
- Notrufsysteme
- Rückhalte- und Hebebecken
- Tunnelfunkanlage
- Energieversorgung
- Betriebstechnik (Raumlüftung, Einbruchmeldeanlage etc.)<sup>418</sup>

Diese Funktionseinheiten können für eine Unterteilung der technischen Anlagen auf der ersten Ebene herangezogen werden.

Die Außenschale des Tunnels übernimmt i.d.R. die Sicherung der Standfestigkeit unmittelbar nach dem Ausbruch und bleibt für die Gesamtnutzungsdauer bestehen. Daher kann diese Funktionseinheit für die Instandsetzung vernachlässigt werden und wird nur für die Berechnung der Herstellungskosten berücksichtigt. An der Innenschale bzw. dem Rahmentragwerk bei der

<sup>416</sup> Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020, S. 135.

<sup>417</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: ASB-ING Anweisung Straßeninformationsbank, Segment Bauwerksdaten. 2013. S9 ff.

<sup>418</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 48.



offenen Bauweise werden während der Gesamtnutzungsdauer Betoninstandsetzungen vorgenommen. Ein kompletter Abbruch der Innenschale mit anschließender Erneuerung erfolgt am Ende der Gesamtnutzungsdauer. Die Bauteile der baukonstruktiven sowie der technischen Ausstattung werden während der Gesamtnutzungsdauer entsprechend ihrer Lebensdauer erneuert. Zunächst wurden basierend auf der Literatur – vor allem auf der RABT und ZIEGEL – folgende Aufteilung der Funktionseinheiten gebildet:

Baugruppe	Funktionseinheit
Baukonstruktion	Gründung
	Baugrubenverbau (offene Bauweise)
	Sicherung
	Innenschale/Rahmentragwerk
Ausstattung	Fahrbahn
	Abdichtung
	Kappen
Technische Anlagen	Entwässerung Fahrbahn
	Entwässerung Bauwerk
	Beleuchtung
	Belüftung
	Verkehrstechnische Anlagen
	Notrufeinrichtung
	Videoüberwachung
	Tunnelfunk
	Lautsprecheranlage
	Brandmeldeanlage
	Löscheinrichtungen
	Energieversorgung
	Steuerung und ZLT

**Tabelle 5-11: Funktionseinheiten Tunnelbauwerke**

Im Folgenden ist die Weiterentwicklung der Funktionseinheiten dargestellt. Eine weitere Unterteilung auf Positionsebene erfolgt in Kapitel 5.2 im Rahmen der Genese von Standardraumstrukturen.

Übergeordnete FE	Untergeordnete FE	Bauteile
Fahrbahn	-	Deckschicht
		Tragschicht
Entwässerung	Entwässerung Bauwerk	Leitung Bergwasserdrainage
		Entwässerungsschacht
	Entwässerung Fahrbahn	Längsentwässerungsleitung
		Schlitzrinne
Beleuchtung	Adaptionsbeleuchtung	Entwässerungsschacht
		Leuchtmittel
		Befestigung
	Durchfahrtsbeleuchtung	Tunnelleuchte
		Leuchtmittel
		Befestigung
	Fahrbahnmarkierungsleuchten	Tunnelleuchte
	Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung	Selbstleuchtendes Markierungselement
		LED-Hinweisleuchte Notrufstation
		Fluchtweghinweisleuchte
LED-Türmarkierung		
Messtechnik	Umfeldleuchtdichtekamera	
	Innen-Leuchtdichtekamera	
Belüftung	Ventilatoren	Ventilator
		Befestigung
		Antriebsmotor
	Messtechnik	Sichttrübenmesseinrichtung
		CO- Gaswarngerät
		Strömungsmesseinrichtung
Verkehrstechnische Anlagen	Verkehrszeichen	Wechselverkehrszeichen
		Wechsellichtzeichen
		Statisches Verkehrszeichen
	Verkehrsdatenerfassung	Induktivschleife
		Schleifendetektor zur Auswertung
		Streckenstation inkl. Schaltanlage
	Schrankenanlage	Horizontalsperrschranke
Notrufstation	-	Verblendung Notrufstation
		Notrufmelder als Wandtelefon
		Notrufsäule (Portalbereich)
Videoüberwachung	-	Tunnel- und Außenkamera
		Befestigung
Tunnelfunkanlage	-	Koaxialkabel zur Verbindung des Strahlerkabels mit der Tunnelverstärkeranlage
		Strahlerkabel für Empfang und Aussenden von Signalen
		Antennen
Lautsprecheranlage	-	Lautsprecher
Brandmeldeanlage	Manuelle Brandmeldeanlage	Druckknopfmelder
	Automatische Brandmeldeanlage	Optischer Melder/ Multisensormelder
		Linienbrandmelder als Sensorkabel
Löscheinrichtungen	-	Rauchabsaugsystem
		Handfeuerlöscher
		Druckerhöhungsanlage
Energieversorgung	Mittelspannungsanlage	Löschwasserleitung
		Gießharztransformator
		Öl-Verteilungstransformator
	Niederspannungsanlage	MS-Einspeisefeld
		Ausbauteile
		Schaltschränke
		Schaltschränke-Dachlüfter
		Kompensationsanlage
		USV-Anlage
USV-Anlage	Batterieanlage	
	Verkabelung	
Steuerung und ZLT	Software	Hochverfügbare SPS
		SPS-Steuerung
		BUS-System
		Steuerungssoftware
		Zentraler Leitrechner
	Hardware	Hardware

Tabelle 5-12: Überblick über die Bauteilebenen von Tunnelbauwerken

### 5.1.3.2 Instandsetzungsgruppen

Es ist zu erkennen, dass für die Instandsetzung von Tunnelbauwerken mehr Bauteile  $BT_{ir}$  berücksichtigt werden müssen als für Brückenbauwerke. Dies liegt an der umfangreichen Betriebs- und Sicherheitsausrüstung von heutigen Tunnelbauwerken, welche eine kürzere Nutzungsdauer aufweisen als Bestandteile des Rohbaus. Die Bauteile der technischen Ausstattung stehen teilweise in unmittelbarem Zusammenhang mit der Baukonstruktion. Die Installationen können u.a. in fest definierte Materialschichten von Decken-, Wand- oder Fahrbahnaufbauten integriert werden. Beispielsweise befindet sich die Löschwasserleitung i.d.R. unterhalb der Fahrbahn, so dass eine eigenständige Instandsetzung der Rohre nicht möglich ist.

Ausstattungsbestandteile der technischen Ausrüstung wie bspw. die Beleuchtung oder Belüftung können in der Regel einfach demontiert werden. Die einzelnen technischen Anlagen können daher unabhängig voneinander instandgesetzt werden. Abbildung 5-7 zeigt die Abhängigkeiten der Bauteile im Fahrbahnbereich. In Abbildung 5-8 sind die Abhängigkeiten der Bauteile im Wand- und Deckenbereich dargestellt.

Fahrbahnbereich	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abkürzung (...)	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Deckschicht	x		x		x	
Tragschicht	x			x		x
Löschwasserleitung	x			x		x
Induktivschleife	x			x		x
Schlitzrinne	x		x		x	
Entwässerungsschacht für Schlitzrinne		x		x	x	
Reinigungsrohr Schlitzrinne	x			x		x
Entwässerungsrohr Längsentwässerung	x			x		x
Rohrleitung als Siphon	x			x		x
Schacht für Tunnellängsentwässerung		x	x		x	

Abbildung 5-7: Analyse der physischen Abhängigkeiten im Fahrbahnbereich

Wand/ Deckenbereich	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Abdichtung	x			x		x
Innenschale Wand	x		x		x	
Innenschale Decke	x		x		x	
bergwasserdrainage zw. Innen und Außenschale	x			x		x

Abbildung 5-8: Analyse der physischen Abhängigkeiten im Wand- und Deckenbereich

Aus den oben identifizierten physischen Abhängigkeiten ergeben sich die in Tabelle 5-13 dargestellten Instandsetzungsgruppen für Bauteile im Tunnel:

Maßgebendes Bauteil	Instandsetzungsgruppe	Bauteile
Fahrbahn		
Entwässerung Fahrbahn	IG 1	Fahrbahn
Entwässerung Bauwerk	IG 2	Innenschale Abdichtung
Beleuchtung	IG 3	
Belüftung	IG 4	
Verkehrszeichen	IG 5	
Verkehrsdatenerfassung	IG 6	Fahrbahn
Schrankenanlage	IG 7	
Videoüberwachung	IG 8	
Tunnelfunk	IG 9	
Lautsprecheranlage	IG 10	
Notrufeinrichtungen	IG 11	
Brandmeldeanlage	IG 12	
Löscheinrichtung (außer Löschwasserleitung)	IG 13	
Löschwasserleitung	IG 14	Fahrbahn
Mittelspannungsanlage	IG 15	
Niederspannungsanlage	IG 16	
USV-Anlage	IG 17	
Verkabelung	IG 18	Kappen
Steuerung	IG 19	
Abdichtung	IG 20	Abdichtung Innenschale
Kappen	IG 21	Kappen
Innenschale	IG 22	Innenschale

**Tabelle 5-13: Überblick über die Instandsetzungsgruppen von Tunnelbauwerken**

Die dazugehörige Einflussmatrix ist in Abbildung 5-9 dargestellt.

Einfluss von	auf																						
	Fahrbahn	Entwässerung Fahrbahn	Entwässerung Bauwerk	Innenschale	Abdichtung	Kappen	Beleuchtung	Belüftung	Verkehrszeichen	Verkehrsdatenerfassung	Schrankenanlage	Videoüberwachung	Tunnelfunk	Lautsprecheranlage	Notrufeinrichtungen	Brandmeldeanlage	Löscheinrichtung	Löschwasserleitung	Mittelspannungsanlage	Niederspannungsanlage	USV-Anlage	Verkabelung	Steuerung
Fahrbahn	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Entwässerung Fahrbahn	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entwässerung Bauwerk	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Innenschale	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abdichtung	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kappen	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Beleuchtung	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Belüftung	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verkehrszeichen	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Verkehrsdatenerfassung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Schrankenanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Videoüberwachung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tunnelfunk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Lautsprecheranlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Notrufeinrichtungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Brandmeldeanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Löscheinrichtung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Löschwasserleitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Mittelspannungsanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Niederspannungsanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
USV-Anlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Verkabelung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Steuerung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Abbildung 5-9: Einflussmatrix physische Abhängigkeiten Tunnelbauwerke

Bei Tunnelbauwerken sind aufgrund der technischen Anlagen neben den physischen auch funktionale Abhängigkeiten zu berücksichtigen. Besteht eine funktionale Abhängigkeit bringt der Ausfall eines Bauteils automatisch einen Funktionsverlust eines oder mehrerer Bauteile mit sich. Die Stromversorgung hat dabei die meisten funktionalen Abhängigkeiten. Fällt sie aus, sind die gesamten technischen Anlagen nicht mehr mit Strom versorgt und somit nicht mehr funktionsfähig. Für einen festgelegten Zeitraum kann die USV-Anlage die Stromversorgung der wichtigsten Anlagen zwar sicherstellen, dennoch kommt es zu einem Funktionsverlust. Das gleiche gilt für die Steuerung. Bei einem Ausfall können die technischen Anlagen weiterbetrieben werden. Allerdings lassen diese sich nicht mehr entsprechend steuern, was ebenfalls zu einem Funktionsverlust führt. Abbildung 5-10 zeigt die Einflussmatrix für funktionale Abhängigkeiten in Tunnelbauwerken.

Einfluss von	auf																						
	Fahrbahn	Entwässerung Fahrbahn	Entwässerung Bauwerk	Innenschale	Abdichtung	Kappen	Beleuchtung	Belüftung	Verkehrszeichen	Verkehrsdatenerfassung	Schrankenanlage	Videoüberwachung	Tunnelfunk	Lautsprecheranlage	Notruf-einrichtungen	Brandmelde-anlage	Löscheinrichtung	Lösch-wasserleitung	Mittelspannungs-anlage	Niederspannungs-anlage	USV-Anlage	Verkabelung	Steuerung
Fahrbahn	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Entwässerung Fahrbahn	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entwässerung Bauwerk	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Innenschale	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Abdichtung	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kappen	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beleuchtung	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Belüftung	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Verkehrszeichen	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Verkehrsdatenerfassung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Schrankenanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Videoüberwachung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Tunnelfunk	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Lautsprecheranlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Notruf-einrichtungen	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0
Brandmeldeanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
Löscheinrichtung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
Löschwasserleitung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Mittelspannungsanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Niederspannungsanlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
USV-Anlage	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Verkabelung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0
Steuerung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Abbildung 5-10: Einflussmatrix funktionale Abhängigkeiten Tunnel

## 5.2 Genese von Standardraumstrukturen

Zur Entwicklung von Standardraumstrukturen ist die Beantwortung der Frage, welcher Funktionseinheit ein Standardraum zugeordnet werden muss, essenziell. Eine Standardraumstruktur repräsentiert einen definierten Bereich eines Objekts, welcher zu einem fiktiven Standardraum zusammengefasst wird. Eine Kombination aller Bausteine ermöglicht eine Darstellung des Gesamtbauwerkes. Im Folgenden werden die Standardraumstrukturen als praxistaugliche Objekte explizit für Verkehrsinfrastrukturbauwerke auf Basis der in Kapitel 4.4 erarbeiteten Theorie erstellt. Es werden die benötigten Standardräume analysiert und darauf aufbauend baukonstruktive und technische Ausführungsvarianten betrachtet. In einem separaten Standardraum werden für Bauteile, welche während der wirtschaftlichen Nutzungsdauer erneuert werden, Positionen für den Ausbau bzw. den Abbruch berücksichtigt. Die detaillierten Leistungsbeschreibungen der einzelnen Standardräume können dem Anhang entnommen werden. Die den Positionen der einzelnen Standardräume zugeordneten Kostenkennwerte wurden im Rahmen der Anwendung des Modells (vgl. Kapitel 7) zur Berechnung des Beispielprojekts für das Jahr 2022 berechnet.

Um die Skalierung der Standardraumstruktur auf die realen Gegebenheiten zu ermöglichen, bedarf es einiger Angaben des Anwenders, wie z.B. Abmessungen des Bauwerks und die Art der Konstruktion. Die Herleitung der Ausstattung und Dimensionierung der Standardräume erfolgt mit den einschlägigen Regelwerken und Normen (vgl. 4.4). Zusätzlich dienen vorhandene Leistungsverzeichnisse als Grundlage für die Erstellung der Standardräume. In Abbildung 5-11 ist die vollständige Genese eines Standardraums in Form einer Entwicklungsmethodik dargestellt.

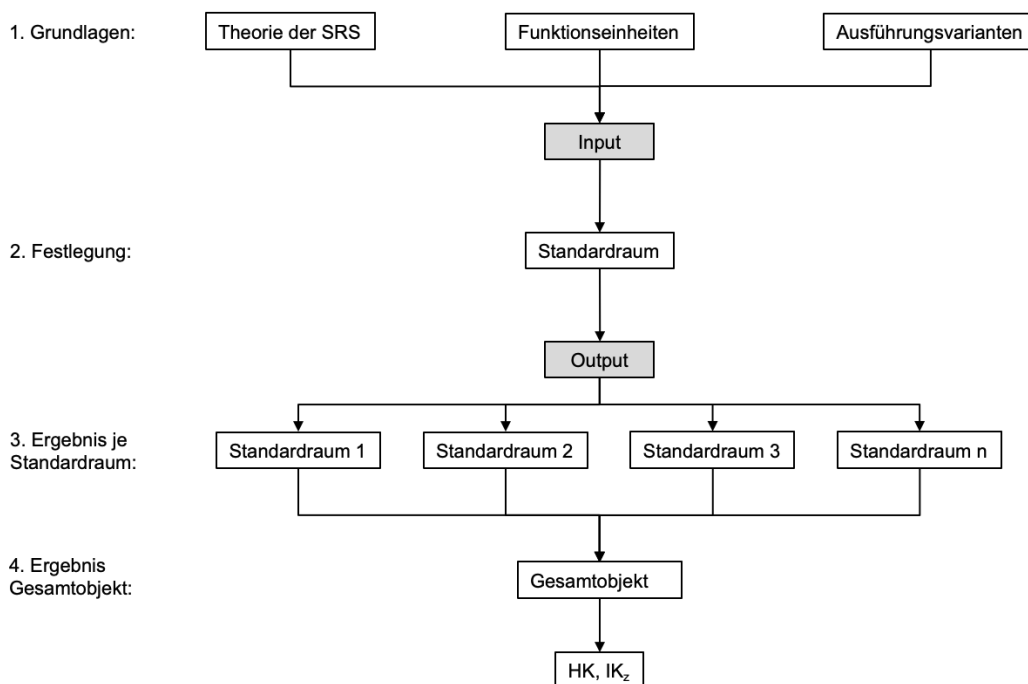


Abbildung 5-11: Entwicklungsmethodik der Standardraumstrukturen

### 5.2.1 Datenbasis

Für die Erstellung der Standardraumstrukturen standen verschiedene Beispielprojekte mit dazugehörigen Baubeschreibungen und Plänen zur Verfügung. Die Leistungsverzeichnisse wurden neben Entwurfsgrundlagen für die Erstellung der einzelnen Standardräume genutzt. Mit Hilfe der Kostenkennwerte konnte eine empirische Kostendatenbank für eine statistische Analyse erstellt werden (vgl. Kapitel 7.3).

Der Bauwerksname, die Lage und die individuellen Eigenschaften wurden aus datenschutzrechtlichen Gründen anonymisiert und die weiteren Angaben gerundet, um einen etwaigen Rückschluss auszuschließen. Aus demselben Grund wird das Baujahr nicht erwähnt, ist für die Auswertung aber bekannt. Die Projekte werden fortlaufend mit einer Projektnummer nummeriert.

Die Datenbasis besteht für die Baugruppe „Technische Anlagen“ von Tunnelbauwerken aus elf Beispielprojekten mit Leistungsverzeichnissen, von denen für sechs Projekte Preisspiegel mit Angeboten aller Bieter vorlagen. Die restlichen fünf Projekte enthielten bepreiste Leistungsverzeichnisse. Anlagen der Entwässerung sind in diesen Leistungsverzeichnissen nicht vorhanden.

Lfd. Projekt-Nr.	Länge	Querschnitt	Straßenart	Projektart
1	1 x 1800 m	RQ 10,5 T	Landesstraße	Neubau
2	2 x 500 m	RQ 26 Tr	Autobahn	Sanierung
3	2 x 700	RQ 26 Tr	Autobahn	Neubau
4	2 x 600 m	23,00 m	Autobahn	Neubau
5	1 x 1900 m	RQ 10,5 T	Bundesstraße	Sanierung
6	1 x 1600 m	RQ 10,5 T	Bundesstraße	Sanierung
7	2 x 900 m	23,00 m	Autobahn	Neubau
8	1 x 750 m	RQ 10,5 T	Bundesstraße	Neubau
9	1 x 700 m	RQ 10,5 T	Bundesstraße	Neubau
10	2 x 750 m	RQ 26 t	Autobahn	Sanierung
11	2 x 700 m	RQ 26 t	Autobahn	Neubau

**Tabelle 5-14: Datenbasis für die Baugruppe Technische Anlagen bei Tunnelbauwerken**

Für die Baugruppen „Baukonstruktion“ und „Ausstattung“ (inkl. Entwässerungsanlagen) von Tunnelbauwerken lagen insgesamt neun verschiedene Projekte zur Analyse vor. Bei allen Projekten handelt es sich um Neubauten. Die Fertigstellung der Projekte lag zwischen 2002 – 2018.



Lfd. Projekt-Nr.	Länge	Querschnitt	Straßenart	Bauweise
1	1 x 1800 m	RQ 10,5 T	Landesstraße	bergmännisch
2	2 x 1700 m	RQ 31 t	Autobahn	bergmännisch
3	2 x 600 m	23,00 m	Autobahn	offen
4	2 x 600 m	RQ 26 t	Autobahn	Bergmännisch
5	2 x 590 m	RQ 26 t, RQ 33 t	Autobahn	Bergmännisch, offen
6	1 x 750 m	RQ 10,5 T	Bundesstraße	bergmännisch
7	1 x 700 m	RQ 10,5 T	Bundesstraße	Bergmännisch, offen
8	2 x 750 m	RQ 26 t	Autobahn	bergmännisch
9	2 x 700 m	RQ 26 t	Autobahn	offen

Abbildung 5-12: Datenbasis für die Baugruppe Baukonstruktion bei Tunnelbauwerken

Für die Genese Standardraumstrukturen von Brückenbauwerken konnten im Rahmen der Datenerhebung 27 Projekte untersucht werden. Die Projekte umfassen sowohl große Autobahnbrücken als auch kleinere Brücken auf Gemeinde- und Landesstraßen.

Lfd. Projekt-Nr.	Länge [m]	Breite [m]	Anzahl Felder	Tragwerk	Querschnitt
1	65,00	13,00	6	Durchlaufträger	Stahlplatte, Aufbeton
2	15,00	14,00	1	Einfeldbrücke	Platte
3	13,00	15,00	1	Rahmenbrücke	Plattenbalken
4	12,00	12,00	1	Rahmenbrücke	Plattenbalken
5	5,00	10,00	1	Rahmenbrücke	Plattenbalken
6	40,00	12,00	1	Rahmenbrücke	Plattenbalken
7	8,00	14,00	1	Rahmenbrücke	Platte
8	8,00	10,00	1	Rahmenbrücke	Platte
9	18,00	12,00	1	Einfeldbrücke	Plattenbalken
10	5,00	10,00	1	Rahmenbrücke	Platte
11	245	31	6	Semiintegrale Mehrfeldbrücke	Plattenbalken
12	210	31	6	Durchlaufträger	Plattenbalken
13	340	34	8	Durchlaufträger	Hohlkasten
14	350	36	8	Durchlaufträger	Hohlkasten
15	40	12	1	Rahmenbrücke	Plattenbalken, Stahlverbund
16	25	12	1	Einfeldbrücke	Plattenbalken
17	8	17	1	Einfeldbrücke	Rahmenbrücke
18	115	4,00	6	Durchlaufträger	Fertigteile
19	120	4,00	7	Durchlaufträger	Fertigteile
20	34	6,00	2	Durchlaufträger	Plattenbalken
21	40	12	1	Einfeldbrücke	Plattenbalken
22	28	12	1	Einfeldbrücke	Plattenbalken
23	45	15,00	3	Durchlaufträger	Plattenbalken
24	9	12	1	Einfeldbrücke	Massivplatte
25	11	3	1	Einfeldbrücke	Massivplatte
26	20	17,00	1	Einfeldbrücke	Plattenbalken
27	75	3,00	3	Durchlaufträger	Plattenbalken

Abbildung 5-13: Datenbasis für Brückenbauwerke

## 5.2.2 Priorisierung von Leistungen

Für die Herleitung der Leistungspositionen zur Erstellung der Standardräume stehen im Bereich von Straßenverkehrswegen, Brückenbauwerken sowie für die Baukonstruktion und Ausstattung von Tunnelbauwerken standardisierte Texte für die Erstellung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau zur Verfügung, welche für die Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung von Leistungen verwendet werden. Anhand dieser standardisierten Leistungspositionen des Standardleistungskatalogs für den Straßen- und Brückenbau der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) lassen sich die verschiedenen zur Verfügung stehenden Daten miteinander vergleichen und die Positionen für die Standardräume herleiten (vgl. Kapitel 3.4.2).

Für die technische Ausstattung von Tunnelbauwerken existieren derartige vorgefertigte Leistungstexte nicht, was eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Projekte sowie die Herleitung von Leistungspositionen erschwert. Aufgrund der Zielsetzung, nur kostenrelevante Leistungen in die Standardraumstrukturen aufzunehmen, um so die benötigten Informationen gering zu halten und dennoch keinen Verlust der Genauigkeit zu riskieren, wird auf Basis der beschriebenen Daten für die Leistungen der Kostengruppe 400 nach DIN 276 von Tunnelbauwerken (ausgenommen Entwässerung) eine ABC-Analyse durchgeführt, um maßgebliche Positionen zu identifizieren und nicht kostenrelevante Positionen vom Modell auszuschließen. Die Ergebnisse der Analyse bilden die Grundlage für die Genese der Standardräume in Kapitel 5.2.2.

Die Daten- bzw. Untersuchungs-Priorisierung basiert auf dem „Pareto Prinzip“. Das Prinzip besagt, dass 80 % von Effekten bzw. Kosten von nur 20 % der Ursachen bzw. der Leistungen verursacht werden.

Als Werkzeug für die Priorisierung der „kostenrelevanten“ Positionen dient die ABC-Analyse (gem. Kapitel 4), welche alle Positionen in verschiedene Klassen je nach deren Anteil an den Gesamtkosten gliedert. Die ABC-Klassen wurden dabei wie folgt definiert:

- Positionen Klasse „A“ bilden 80 % der Gesamtkosten einer Baumaßnahme,
- Positionen Klasse „B“ bilden weitere 15 % der Gesamtkosten,
- Positionen Klasse „C“ bilden die letzten 5 % der Gesamtkosten.

Die Gesamtkosten wurden im Rahmen dieser Arbeit als Gesamtnettobetrag den Leistungsverzeichnissen entnommen. Die als relevant identifizierten Positionen sind Teil der Standardraumstrukturen.

Als Ergebnis der ABC-Analyse wurden alle Positionen innerhalb der einzelnen Bauwerke nach ABC-Klassen kategorisiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Positionen auf Bauwerksebene isoliert klassifiziert wurden und von unterschiedlicher Kostenrelevanz für die verschiedenen Bauwerke sind, kann ein und dieselbe Position innerhalb verschiedener Bauwerke unterschiedlichen Klassen zugeordnet werden.

Für Tunnelbauwerke konnten über alle untersuchten Bauwerke hinweg insgesamt 839 Positionen (ca. 16 %) als kostenrelevant eingestuft und Klasse „A“ zugeordnet werden. Diese Positionen machen 80 % der Gesamtkosten aus. Ca. 27 % (1.418 Positionen) wurden Klasse „B“

zugeordnet. 58 % der Positionen bilden die restlichen 5 % der Gesamtkosten ab. Somit werden 95 % der Gesamtkosten von ca. 32 % der Positionen verursacht. Abbildung 5-14 zeigt die grafische Verteilung.

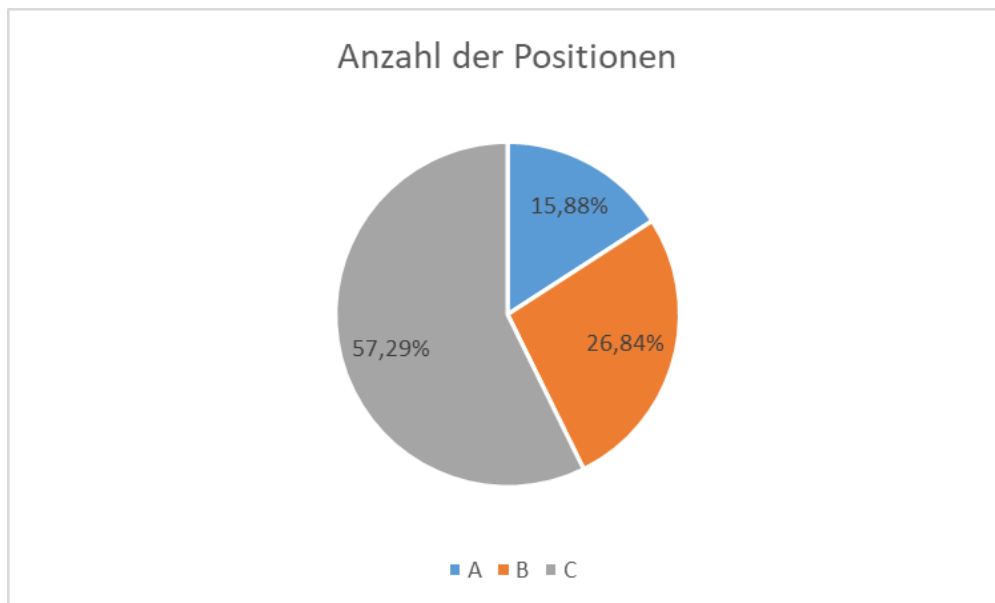


Abbildung 5-14: Ergebnisse der ABC-Analyse für Tunnelbauwerke – Teil 1

Die ungleiche Verteilung lässt sich auch in Abbildung 5-15 erkennen. Die orange Kurve stellt den Idealfall dar, wenn eine gleichmäßige lineare Verteilung vorliegen würde. In diesem Fall hätte jede Position denselben Anteil an den Gesamtkosten. Die blaue Kurve weicht deutlich von diesem Idealfall ab. Auch hier ist zu erkennen, dass 20 % der Kosten von ca. 84 % der Positionen verursacht werden.

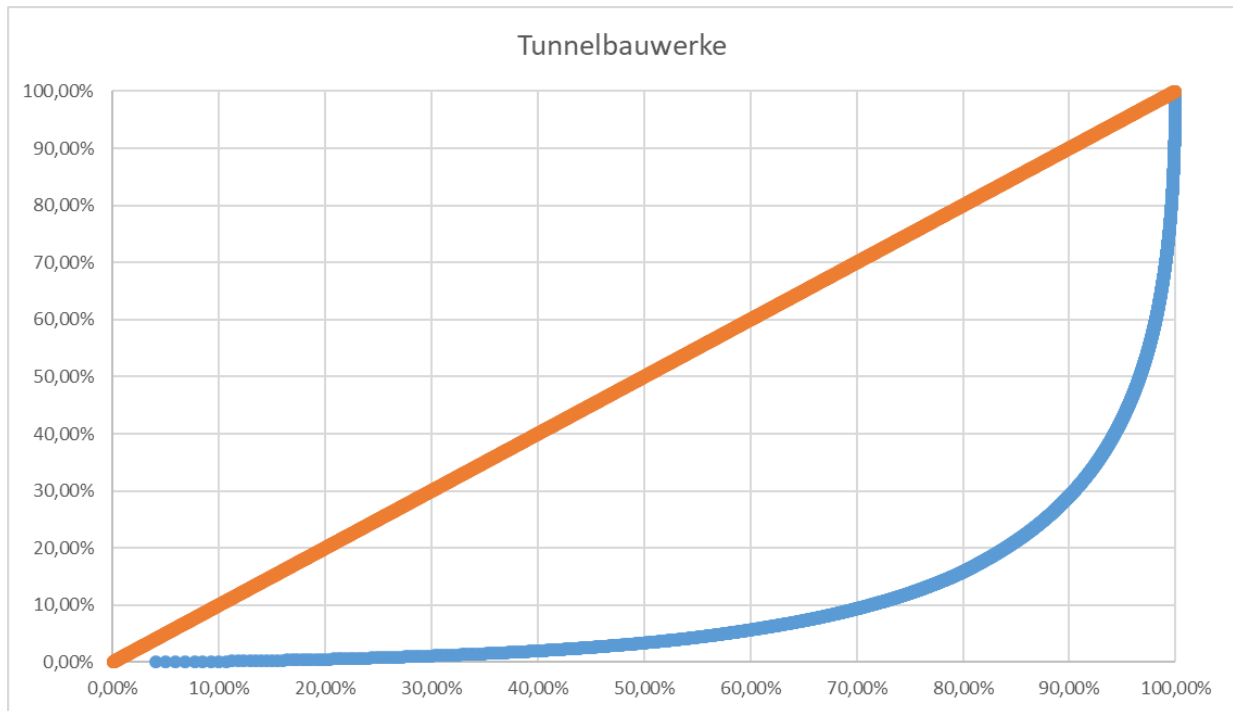


Abbildung 5-15: Ergebnisse der ABC-Analyse für Tunnelbauwerke - Teil 2

Positionen, die den Klassen „A“ und „B“ zugeordnet wurden, müssen auf Basis ihrer Langtexte miteinander verglichen werden, um mehrfach enthaltene Positionen zu entfernen. Leistungspositionen, welche dasselbe Bauteil mit unterschiedlichen Spezifikationen beschreiben, wurden ebenfalls entfernt. Beispielsweise gab es mehrere Positionen zu Leistungsschaltern mit unterschiedlichen Eigenschaften. Hier wurde eine Position zu dieser Leistung berücksichtigt. Positionen der Baustelleneinrichtung wurden ebenfalls vernachlässigt, da diese kein Bestandteil der Standardraumstrukturen sind. Nach der Bereinigung der Daten ergaben sich insgesamt 692 kostenrelevante Positionen für die technische Ausstattung von Tunnelbauwerken. Diese können den detaillierten Leistungsbildern der Standardräume im Anhang entnommen werden.

### 5.2.3 Standardraumstruktur Brücken

Für das Objekt Brücke lassen sich aufbauend auf der Objektstruktur aus Kapitel 5.1.2 entsprechend des Rahmenmodells aus Abbildung 4-12 folgende Standardräume ableiten:

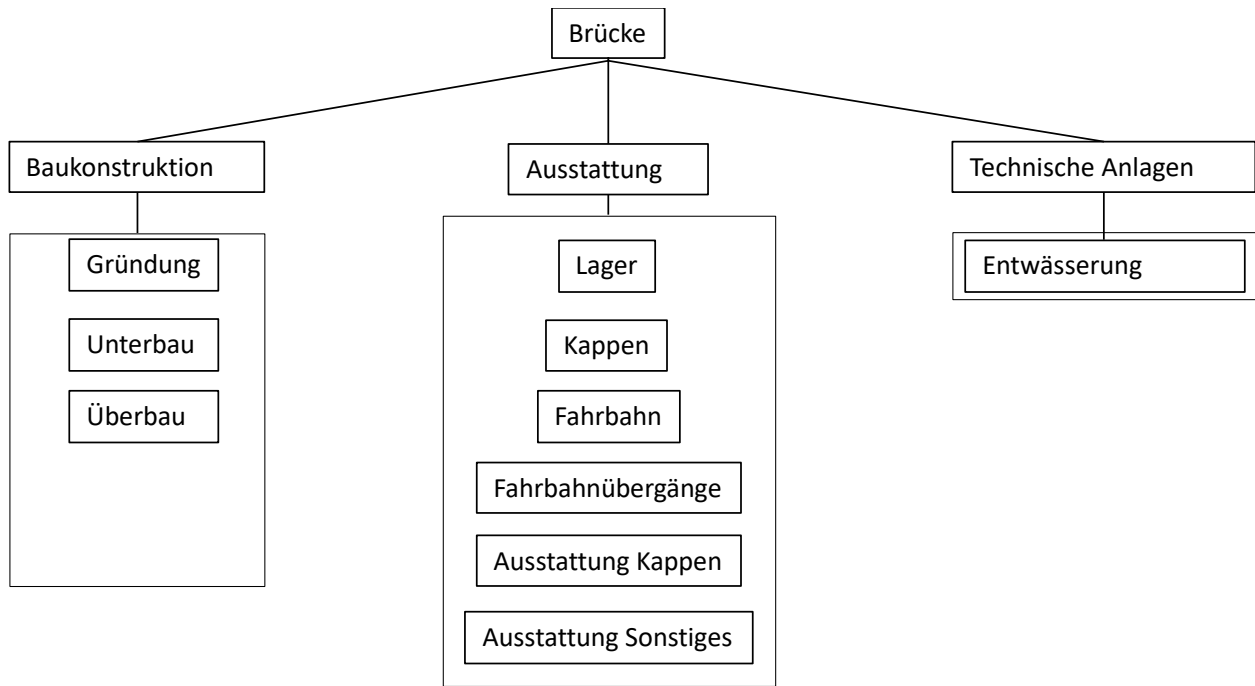


Abbildung 5-16: Rahmenmodell Brücke

In Abbildung 5-17 sind die übergeordneten Bauwerksdaten dargestellt, welche für die Anwendung des Modells eingetragen werden müssen.

Bauwerksdaten	
Objekt	
Baumaterial	
Bauwerksart	
Gesamtlänge	
Breite	
Anzahl Pfeiler	
Anzahl Überbauten	

Abbildung 5-17: Eingabemaske Bauwerksdaten

### 5.2.3.1 Gründung

Für den Standardraum Gründung werden Angaben zu Flachgründungen gemacht. Für Tiefgründungen werden Positionsbeschreibungen und Formeln zur Mengenermittlung in das Modell integriert. Da die Mengen dieser Positionen stark von den örtlichen Gegebenheiten des Projekts abhängig sind, können die Mengen nicht auf Basis standardisierter Formeln ermittelt werden. Die dafür benötigten Eingaben zur Berechnung der Mengen (vgl. Abbildung 5-18) sind von den Fachplanern zu liefern. Dadurch lassen sich auch für diese Positionen die Mengen und Kosten berechnen.

Gründung	
Flachgründung	○
Pfahlgründung	○
Durchmesser	
Gesamtlänge der Pfähle	
Bewehrungsgrad Fundamente	
Bewehrungsgrad Pfahlkopfplatte	

Abbildung 5-18: Angaben Standardraum Gründung

Für Flachgründungen werden im Standardraum Positionen für die Sauberkeitsschicht und ein bewehrtes Ortbetonfundament integriert. Für die Sauberkeitsschicht wird eine Dicke von 10 cm angenommen, für das Ortbetonfundament eine Dicke von 1,20 m. Diese Angaben konnten durch die vorliegenden Projekte bestätigt werden. Die Breite der Fundamente unter den Widerlagern entspricht der Widerlagerbreite mit einem Überstand von 0,5 m. Die Länge des Fundaments unter den Widerlagern entspricht der Länge der Flügelwand mit zusätzlich 1,00 m. Für Fundamente unter Pfeilern gelten die Annahmen entsprechend.

Fundament Widerlager	Dicke Fundament	1,20 m
	Breite Fundament	Breite Widerlager + 2*0,5 m
	Länge Fundament	Länge Flügel oben + 2*1,00 m

Abbildung 5-19: Grundannahmen Standardraum Gründung

### 5.2.3.2 Unterbau

Der Standardraum Unterbau enthält Positionen für folgende Bauteile:

- Widerlager
- Pfeiler

Für Pfeiler wird von einem rechteckigen Vollquerschnitt ausgegangen, bestehend aus dem Pfeilerschaft, dem Pfeilerkopf mit Lagersockel, Höhenmesspunkten und abnehmbarem Vogeleinflugschutz. Die Anzahl der Pfeiler ergibt sich aus der Anzahl der Felder, die Höhe der einzelnen Pfeiler ist ebenso wie der Bewehrungsgrad in das Modell einzugeben. Die Pfeilerbreiten werden bei einem Plattenbalkenquerschnitt entsprechend der Breite der Stege angesetzt. Bei einem Hohlkastenquerschnitt ergibt sich die Breite des Pfeilerkopfes aus der unteren Breite des Hohlkastens. Die Dicke des Pfeilerkopfes wird auf 3,00 m festgesetzt. Der Pfeilerkopf wird von zwei symmetrischen Stützen mit einem Rechteckquerschnitt und einer Breite von 2,00 m getragen.

Der Standardraum Widerlager umfasst den Bereich der Flügel-, Kammer- und Widerlagerwände mit Fugenbändern und Fugeneinlagen, bis hin zur Oberkante der Lagersockel bzw. zum Überbauende. Der Auflagersockel für das Grundrohr wird ebenfalls dieser Raumstruktur zugeordnet. Unabhängig von der Gestaltung der restlichen Brücke gibt es bei einer Brücke standardmäßig zwei Widerlager, die im Rahmen der Standardisierung als symmetrisch angesehen werden. Alle Positionen werden deshalb mit zwei multipliziert. Erhält die Brücke zwei

separate Überbauten, fallen diese entsprechend größer aus. Die Höhe der Widerlager sowie der Bewehrungsgrad sind für die Mengenermittlung einzutragen.

Für die Auflagerbank wird bei Plattenbrücken eine Tiefe von 2 m festgelegt. Brücken mit aufgelösten Querschnitten erhalten eine Auflagerbank mit 2,7 m Tiefe. Die Höhe der Auflagerbank entspricht der Widerlagerhöhe abzüglich der Konstruktionshöhe und 0,4 m Freifläche für die Lagerung. Die Höhe der Kammerwand setzt sich aus der Konstruktionshöhe zuzüglich 0,4 m zusammen. Die Dicke der Kammerwand beträgt 0,4 m. Die Breite eines Widerlagers ergibt sich aus den Abmessungen des Überbaus. Sie entspricht 28 m bei RQ 31 B, 32 m bei RQ 36 B und 40,5 m bei RQ 43,5 B. Für die Dicke der Flügelwände wird standardmäßig ein Meter festgelegt. Hinter dem Bauwerk wird eine Dränschicht mit 50 cm Überstand angeordnet. Für die Rückflächenentwässerung befindet sich hinter der Widerlagerwand ein Auflagersockel mit den Abmessungen 35 cm x 35 cm. Im Standardwiderlager wird der Lagersockel in C35/45 ausgeführt, die restlichen, tragenden Bauteile in C30/37.

Zur Setzungskontrolle werden die Widerlager mit Höhenmesspunkten aus Kugelbolzen ausgestattet. Bei Einfeldbrücken wird von vier Stück pro Überbau ausgegangen, bei Mehrfeldbrücken ergeben Vergleiche der Referenzprojekte eine zusätzliche Anzahl von drei Stück je Pfeiler. An den Kappen werden weitere Höhenmesspunkte aus Linsenkopfbolzen zur Kontrolle des Überbaus befestigt. Bei Einfeldbrücken fallen 14 Stück pro Überbau an, bei Mehrfeldbrücken liegt die Annahme bei fünf Stück pro Brückenfeld und Überbau. Dies sind aufgerundete Mittelwerte der Vergleichsprojekte.

Die Jahreszahl der Herstellung des Bauwerkes wird ebenfalls am Widerlager vermerkt. Die Ausführung erfolgt gemäß RIZ-ING Jahr 1225 als Relief im Beton. Pro Überbau gibt es eine solche Jahreszahl.

Abbildung 5-20 zeigt die benötigten Eingaben für die Mengenermittlung des Standardraums Unterbau.

Unterbau	
Höhe Pfeiler	
Bewehrungsgrad Pfeiler	
Höhe der Widerlager	
Bewehrungsgrad Widerlager	

Abbildung 5-20: Eingabedaten Standardraum Unterbau

### 5.2.3.3 Erdaushub

Für den notwendigen Erdaushub von Widerlager und Pfeiler wird für das Herstellen der Baugrube ein Aushub der Bodenklasse 3 bis 5 zu Grunde gelegt. Als Bezugsgröße wird das Volumen einer beispielhaften Standardbaugrube herangezogen. Für die Baugrube des Widerlagers wird die Annahme getroffen, dass das Widerlager an einem Geländesprung errichtet wird, der von der unteren Vorderkante des Widerlagers bis zur oberen Hinterkante der Flügelwand verläuft. Der Aushub der rechteckigen Baugrube erfolgt von der Oberkante der Flügelwände bis zur

Unterkante der Fundamentplatte und wird mit einer Neigung von 1:1 geböscht ausgeführt. In der Baugrube wird ein seitlicher Abstand von 60 cm zur Fundamentplatte gewählt, welcher als Arbeitsraum dient. Die hintere Kante der Baugrubensohle verläuft parallel zur hinteren oberen Flügelkante.<sup>419</sup>

Die Hinterfüllung des Widerlagers erfolgt im Bereich des Aushubs. Gemäß RIZ-ING Was 7 wird der Bereich hinter dem Widerlager bis zur Höhe des Grundrohres mit schwach durchlässigem Boden gefüllt. Als Bezugsgröße dient das Volumen aus der Grundfläche der Baugrube und der Höhe der Fundamentplatte plus 1,30 m. Der restliche Entwässerungsbereich wird mit grobkörnigem Boden hinterfüllt. Als Bezugsgröße dient das Volumen der Baugrube hinter dem Widerlager. Die Hinterfüllung erfolgt im gesamten Bereich bis zur Oberkante der Flügelwände. Das Volumen der Widerlager-, Kammer- und Flügelwände und des schwach durchlässigen Materials werden abgezogen. Die Baugruben seitlich des Widerlagers werden mit gemischtkörnigem Boden verfüllt. Als Bezugsgrößen dienen die Bodenvolumina seitlich des Widerlagers und in den Ecken der Baugrube. Die Böschungsneigung entspricht der Annahme, welche bei der Ermittlung des Aushubs getroffen wurde.

Für den Aushub der Baugrube für die Pfeiler wird ebenfalls von einer rechteckigen, 1:1 geböschten Baugrube und den Bodenklassen 3 bis 5 ausgegangen. Die Böschung beginnt nach einem Abstand von 60 cm von der Pfahlkopfplatte, der als Arbeitsraum dient. Weiter wird eine Überdeckung der Pfahlkopfplatte mit einer Bodenschicht von 1,0 m angenommen. Das ermittelte Volumen wird abzüglich der Kubatur der Pfahlkopfplatten und Pfeilerabschnitten von 1,0 m Höhe auch für die Hinterfüllung mit gemischtkörnigem Boden herangezogen.

#### **5.2.3.4 Überbau**

Aufgrund des aktuellen Bestandes an Brückenbauwerken werden folgende Querschnittsformen in die Standardraumstrukturen integriert:

- Hohlkasten
- Plattenbalken
- Massivplatte

Der Standardraum enthält Positionen für den Überbau sowie dessen Bewehrung. Als Material werden ausschließlich Überbauten aus Stahl- und Spannbeton betrachtet, da diese Materialien in Deutschland am häufigsten bei Straßenbrücken verwendet werden. Angaben bezüglich der Geometrie und Abmessungen des Überbauquerschnitts sowie zum Bewehrungsgrad und Spannstahl sind vom Tragwerksplaner anzugeben und für die Mengenermittlung in das Modell einzutragen. Die benötigten Eingaben sind in Abbildung 5-21 dargestellt.

---

<sup>419</sup> Vgl. Kracke, Ernst-August; Lodde, Klaus: Leitfaden Straßenbrücken, Bauingenieur-Praxis. Berlin 2011. S. 277.



Überbau	
Bewehrungsgrad	
Spannstahl	
Konstruktionshöhe	
Dicke der Platte	
Dicke der Stege	
Länge der Kragarme	

Abbildung 5-21: Eingabedaten Standardraum Überbau

### 5.2.3.5 Kappen

Der Standardraum Kappen enthält Positionen für folgende Bauteile:

- Kappen
- Fugen

Brückenkappen stellen den seitlichen Abschluss und die Abgrenzung der Fahrbahn dar - am Rand als Außenkappe oder zwischen zwei Brückenüberbauten als Mittelkappe. Sie sind über Anschlussbewehrung aus Betonstahl an der Kragarmstirnseite mit dem Überbau verbunden und werden fugenlos hergestellt. Auf den Kappen werden sämtliche Schutzeinrichtungen, Geländer und Lärmschutzkonstruktionen montiert (vgl. Abbildung 5-22).<sup>420</sup>

<sup>420</sup> Vgl. Kracke, Ernst-August; Lodde, Klaus: Leitfaden Straßenbrücken, Bauingenieur Praxis, Berlin 2011. S. 285-288.

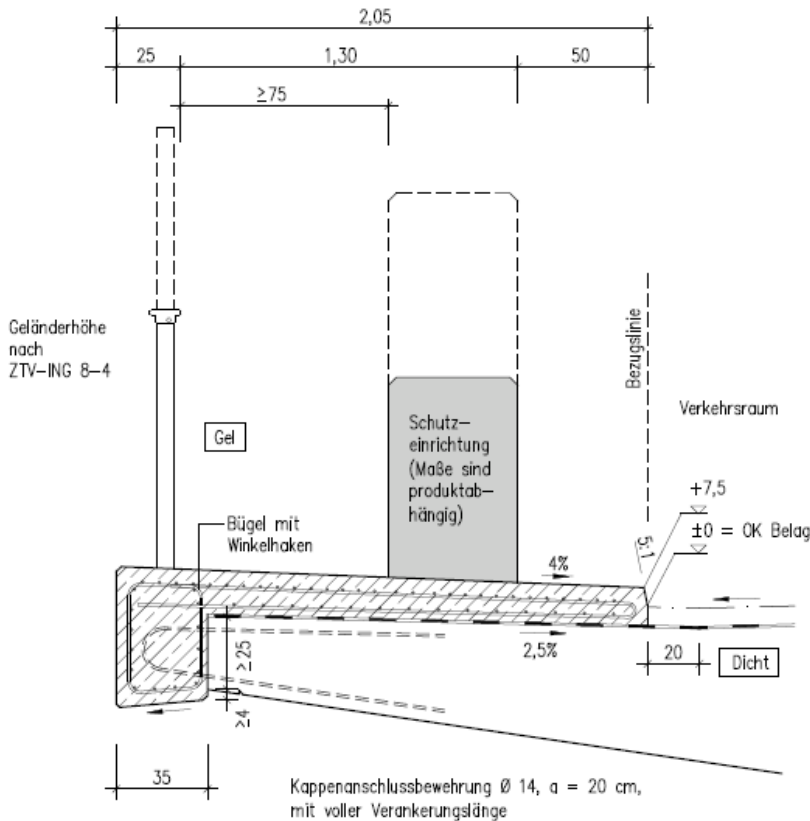


Abbildung 5-22: Kappenausbildung nach RiZ- Ing Kap 1, Blatt 1<sup>421</sup>

Für die Berechnung der Mengen der Kappen wurden basierend auf den einschlägigen Normen und Regelwerken folgende in Abbildung 5-23 dargestellten Grundannahmen getroffen:

Standardraum	Art der Kappe	Annahme
Kappen	Außenkappen ohne Geh- und Radweg:	2,05 m
	Außenkappe mit Geh- und Radweg	3,75 m
	Mittelkappe	1,70 m
	Mittelkappe für B > 40 m	2,50 m
	Überstand Kappe	0,55 m
	Kappendicke unten	0,35 m
	Kappendicke	0,28 m
	Bewehrungsgrad Kappe	0,14 t/m <sup>3</sup>

Abbildung 5-23: Grundannahmen für den Standardraum Kappen

Die Kappen werden aus Stahlbeton hergestellt. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dient das Betonvolumen, welches sich aus den Grundannahmen in Abbildung 5-23 ergibt. Die dazugehörige Bewehrung wird über den festgelegten Bewehrungsgrad und das Betonvolumen

<sup>421</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (RiZ-ING), Kap 1, Blatt 1. Stand 12/2017.

berechnet. Der Abschluss zur Fahrbahn wird von einem Schrammbord aus Granitstein gebildet. Es wird entlang der zweifachen Kappenlänge je Überbau angesetzt.

### **5.2.3.6 Ausstattung auf Kappen**

Der Standardraum Ausstattung auf Kappen besteht aus folgenden Bauteilen:

- Geländer
- Schutzeinrichtung aus Beton
- Lärmschutzwand

Bei Brücken mit bis zu zwei Feldern wird ein Füllstabgeländer aus Stahl mit einer Höhe von 100 cm angebracht. Bei Talbrücken mit mehr als zwei Feldern wird ein Holmgeländer angesetzt. Grund für die Unterscheidung der Geländer ist, dass bei kleineren Brücken in Ortslage oft Geh- und Radwege auf den Brücken angeordnet sind und ein Füllstabgeländer mehr Sicherheit bietet. Auf Brücken auf der freien Strecke ist in der Regel nur ein Notgehweg vorhanden, wofür ein Holmgeländer ausreichend Sicherheit bietet. Diese Annahmen konnten durch die ausgewerteten Referenzprojekte bestätigt werden. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung wird die doppelte Kappenlänge gewählt.

### **5.2.3.7 Fahrbahnbelag**

Der Standardraum Fahrbahnbelag enthält Positionen für folgende Bauteile:

- Fahrbahn
- Abdichtung

Der Fahrbahnbelag einer Brücke besteht aus Abdichtung, Schutzschicht und Deckschicht und schützt die Überbaukonstruktion vor Verschleiß, Wasser, und Frost- und Tausalzbeanspruchung.<sup>422</sup> In Abbildung 5-24 ist ein beispielhafter Aufbau eines Brückenbelags auf einem Betonüberbau dargestellt. Für die Entwicklung des Modells wird der Fahrbahnbelag in die Bauteile Abdichtung und Deckschicht und Schutzschicht unterteilt.

---

<sup>422</sup> Vgl. Kracke, Ernst-August; Lodde, Klaus: Leitfaden Straßenbrücken, Bauingenieur Praxis, Berlin 2011. S. 131.

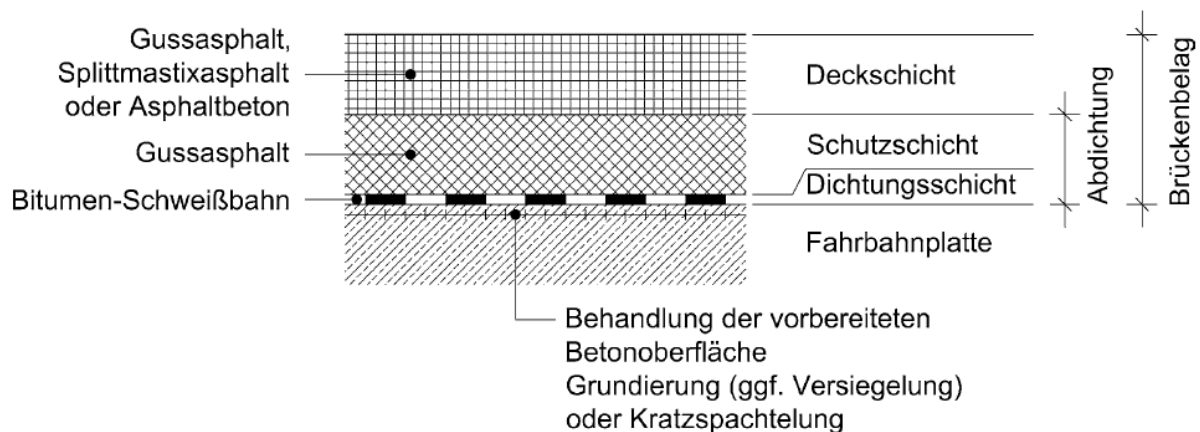


Abbildung 5-24: Beispielhafter Aufbau eines Brückenbelags<sup>423</sup>

Die Fahrbahnplatte erhält auf der Oberfläche eine Grundierung sowie eine Dichtungsschicht aus einer einlagigen Bitumenschweißbahn. Zwischen den Kappen wird eine 4,0 cm dicke Schutzschicht aus Gussasphalt MA11S ausgeführt. Darauf folgt die 3,5 cm dicke Deckschicht aus lärminderndem Splittmastixasphalt SMA8S. Diese wird mit bitumentumhüllter Lieferkörnung 1/3 maschinell abgestreut und abgestumpft. Die Bezugsgröße ist die Fläche der Fahrbahn. Die Anschlussfugen werden mit der Fugenmasse Typ N2 ausgeführt. Die Anschlussfugen an den Kappen werden über die zweifache Kappenlänge angesetzt. Die Fugen entlang der Fahrbahnübergänge werden über die doppelte Fahrbahnbreite je Fahrbahnübergang abgebildet. Die Querfuge zwischen neuer und alter Fahrbahn wird mit einem Fugenband geschlossen, welches je Überbau an beiden Brückenenden über die Fahrbahnbreite verläuft.

Die Fahrbahnmarkierungen werden in der Regel dem übergeordneten Projekt des Straßenbaus zugeordnet und daher im Rahmen des Modells nicht berücksichtigt. Allerdings enthalten die Standardraumstrukturen für Straßenverkehrswege einen Standardraum für Fahrbahnmarkierungen, über den die Kosten berechnet werden können.

Im Bereich der Abdichtung wird zunächst die Betonoberfläche des Überbaus gestrahlt und gereinigt, ehe der Oberflächenschutz aus Reaktionsharz aufgebracht wird. Die Dichtungsschicht besteht aus einer Polymerbitumen-Schweißbahn. Die Schichten der Abdichtung enthalten als Bezugsgröße für die Mengenermittlung die Brückenoberfläche.

### 5.2.3.8 Entwässerung

Nicht funktionstüchtige Entwässerungsanlagen sind oft der Grund für Schäden am Bauwerk. Daraus resultiert eine hohe Priorität von Maßnahmen an Entwässerungseinrichtungen. Durch regelmäßige Streckenkontrollen sowie Kontrollen bei den jährlichen Brückenbesichtigungen soll die Funktionsfähigkeit der Brückenentwässerung sichergestellt werden. Das Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst regelt Leistungen, „die unmittelbar der Wartung sowie der betrieblichen und baulichen Unterhaltung des Straßennetzes dienen und diesem auch in der

<sup>423</sup> Freundt, Ursula; Hölzer, Dirk: Brückenausrüstung. In: Handbuch Brücken. 3. Auflage. Wiesbaden 2014. S. 1132.

Kostenrechnung zugeordnet werden“<sup>424</sup>. Durch diese Leistungen, welche nicht der Erneuerung, sondern dem Betrieb zugeordnet werden, soll die Funktionsfähigkeit der Straße einschließlich ihrer Bestandteile aufrechterhalten werden. Durch derartige Leistungen wird die Substanz nicht verbessert, sondern es soll eine sichere Nutzung und Befahrbarkeit der Straße sowie der Bauwerke garantiert werden.<sup>425</sup>

Das Wasser auf dem Überbau ist durch Brückenabläufe abzuführen. Abläufe sind mindestens vor den Überbauenden anzuordnen. Zusätzlich ist nach ZTV-ING für 400 m<sup>2</sup> Einzugsfläche mindestens ein Ablauf anzuordnen. Die Regelnennweite von Sammelleitungen beträgt DN 200. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung wird die Länge des Überbaus angesetzt. Pro Überbau wird eine Sammelleitung angeordnet. Querleitungen münden von oben in die Längsleitungen und haben eine Regelnennweite von DN 150. Es wird ein 1 m langes Rohr von jedem Brückenablauf zur Sammelleitung angenommen. Hohlkästen erhalten in ihren Tiefpunkten Öffnungen mit Vogeleinflugschutz. Auf das Bauwerk zufließendes Wasser ist vor Brückenbeginn abzuführen.

Die Entwässerung des Widerlagers besteht aus der Entwässerung des Hinterfüllbereichs und der Auflagerbankentwässerung. Hinter der Widerlagerwand wird ein Grundrohr DN150 verlegt, welches das Wasser aus dem Hinterfüllbereich fasst und über seitliche oder frontale Austrittsrohre durch das Widerlager ableitet. An der hinteren Kante der Auflagerbank wird das Wasser in einer Rinne im Beton gesammelt und über Austrittsrohre aus Edelstahl aus dem Widerlager geführt. Ist die Brücke als Rahmenkonstruktion ausgeführt, entfällt die Auflagerbankentwässerung.

### 5.2.3.9 Fahrbahnübergänge

Fahrbahnübergänge unterliegen hohen dynamischen Belastungen. Daher sind sie zu den Verschleißteilen zu zählen und müssen während der Nutzungsdauer einer Brücke mehrmals ausgetauscht werden. Die häufigsten Schäden an Fahrbahnübergangskonstruktionen sind ein undichter Übergang, Korrosion, defekter Belagsanschluss und mechanische Schäden. Diese Schäden machen insgesamt ca.  $\frac{3}{4}$  aller an Fahrbahnübergängen festgestellten Schäden aus.<sup>426</sup> Aufgrund der Schäden, welche durch wasserdurchlässige Übergangskonstruktionen entstehen können, werden heutzutage fast ausschließlich nur noch wasserdichte Übergänge eingebaut. Dies bestätigt auch die Auswertung der Leistungsverzeichnisse, bei welchen Projekten ausschließlich wasserdichte Fahrbahnübergänge eingebaut wurden. Daher wird in diesem Modell immer von einem wasserdichten Übergang ausgegangen.

Solange die Wasserdichtheit des Fahrbahnübergangs gewährleistet ist, betreffen die Schäden nur den Fahrbahnübergang selbst, ohne sich auf andere Bauteile auszuwirken. Sollte der Fahrbahnübergang allerdings undicht sein, kann Feuchtigkeit in die darunterliegenden Bereiche gelangen. Durch erhöhten Chlorideintrag in Unterbauten kann es dann zur Bewehrungskorrosion

---

<sup>424</sup> Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb (Hrsg.): Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen. Allgemeiner Teil. Bonn 2021. S. 12.

<sup>425</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. Länderfachgruppe Straßenbetrieb (Hrsg.): Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen. Leistungsbereich 1 – Bauliche Unterhaltung. Bonn 2021. S. 28.

<sup>426</sup> Vgl. Ladner, Marc: Systematisch Auswertung von Schäden an Brücken. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA Dübendorf. Bern 1994.

kommen. Ein Austausch eines Fahrbahnübergangs wirkt sich nicht auf andere Bauteile aus. Er kann unabhängig von anderen Bauteilen instandgesetzt werden.

Der Fahrbahnübergang wird bei Brücken mit einer Gesamtstützweite von nicht mehr als 100 Metern mit einem Dichtprofil ausgeführt. Dieser Wert ergibt sich aus der zugelassenen Spaltbreite von max. 70 mm (80 mm bei elastischer Lagerung) bei wasserdichten Fahrbahnübergängen mit einem Dichtprofil.<sup>427</sup> Bei größeren Spaltbreiten werden mehrprofilige Übergangskonstruktionen mit bauaufsichtlicher Zulassung eingesetzt. Da sich die Fahrbahnübergänge an der Hinterseite des Widerlagers befinden, empfiehlt sich hier in der Betrachtung keine Trennung in der Autobahnachse. Somit wurden die Werte für den Fahrbahnübergang auf die gesamte Brückenbreite bezogen. Die Bezugsgröße Fahrbahnübergänge stellt die Anzahl an Überbauten und die Überbaubreite mit Überstand der Kappen dar. Fahrbahnübergänge mit drei oder mehr Dichtprofilen erhalten eine geräuschkindernde Oberfläche über die Breite der Fahrbahn.

#### **5.2.3.10 Lager**

Lager gehören wie Fahrbahnübergangskonstruktionen zu den Verschleißteilen. Heutzutage werden bei Brücken nur noch Elastomer- und Kalottenlager eingebaut. Diese haben bei Neubauten Topf-, Rollen- und Kipplager ersetzt, welche für den Brückenbau in der heutigen Zeit keine Rolle mehr spielen und daher auch in diesem Modell vernachlässigt werden.

Die Art der Lagerung richtet sich nach der Gesamtlänge der Brücke. Für Brücken kleinerer und mittlere Spannweiten werden Elastomerlager festgelegt. Bei Brücken größerer Spannweiten erfolgt die Lagerung auf Kalottenlagern. Der Grenzwert wird auf 90 m Gesamtlänge definiert.

An den Widerlagern wird mit zwei Lagern kalkuliert. Bei mehrfeldrigen Brücken kommen pro Pfeiler/Stütze jeweils zwei Lager hinzu. Einfeldrige Brücken erhalten an einem Widerlager ein festes und ein allseitig bewegliches Lager sowie ein allseitig bewegliches und einseitig bewegliches Lager an dem anderen Widerlager. Bei Mehrfeldbrücken erfolgt die Anordnung des festen Lagers in Brückenmitte. Die Widerlager erhalten jeweils ein allseitig und ein einseitig bewegliches Lager.

#### **5.2.3.11 Vogelschutz**

Zum Schutz der Lager werden am Widerlager und an den Pfeilerköpfen Vogelschutzabdeckungen angebracht. Es existieren verschiedene Formen und Materialien für die Ausbildung des Vogelschutzes. Die Vogelschutzabdeckung wird stets analog zur RIZ-ING VES 1 ausgebildet, muss bei Bedarf geöffnet werden können und besteht aus 4 mm dickem Polycarbonat. In den Leistungsverzeichnissen der Referenzprojekte werden die Abdeckungen meist bezogen auf Stück oder Meter angegeben. Da die Kosten der Abdeckungen allerdings von deren Abmessungen abhängen, dient im Modell die Fläche zwischen der Auflagerbank und der Unterkante des Überbaus als Bezugsgröße. Am Pfeiler verläuft die Abdeckung zwischen Pfeilerkopf und Unterkante des Überbaus einmal um den Umfang des Pfeilers herum. Die

---

<sup>427</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 8. Brückenausstattung. Abschnitt 1. Fahrbahnübergänge aus Stahl und Elastomer. Stand: 12.2012, S. 5.

Nischen entlang der Pfeiler, in denen das Fallrohr der Überbauentwässerung verläuft, werden mit nichtrostendem Stahlblech abgedeckt und vor Vögeln geschützt. Die Nische wird mit 40 cm Breite idealisiert und die Höhe wird über die Länge der Fallrohre abgebildet.

### **5.2.3.12 Böschungstreppe und Pflaster**

Dieser Standardraum umfasst Positionen für die Böschungstreppe und Pflasterdecken im Bereich des Widerlagers, um dieses besser in den Geländeeinschnitt und die Umgebung einzupassen. Es wird von einer Böschungstreppe je Widerlager ausgegangen. Die Bezugsgrößen für die Mengenermittlung beziehen sich auf die Abmessungen des Widerlagers, des Überbaus und der Kappen.

### **5.2.3.13 Gerüste**

Die Standardraumstruktur Bauverfahren enthält Positionen für folgende Bauteile:

- Unterbau
- Überbau
- Kappen

Für die einzelnen Bauteile werden folgende Arten von Gerüsten bzw. Maßnahmen des Bauverfahrens angesetzt:

- Arbeitsgerüste
- Traggerüste
- Hilfskonstruktionen zur Montage
- Taktschiebeverfahren
- Vorschubrüstung
- Freivorbau

In Leistungsverzeichnissen werden die Positionen des Bauverfahrens meist mit der Einheit „pauschal“ versehen. Da sich aber die Kosten mit der Größe des Bauwerkes ändern, werden sie anhand von Bezugsgrößen, welche die Bauwerksabmessungen abbilden, skaliert. Dazu ist die Angabe der lichten Weite zwischen den Widerlagern (Brückenlänge), der Anzahl der Brückenfelder und der mittleren Höhe der Brücke, von OK Gelände bis OK Fahrbahn, erforderlich.

Unabhängig vom Bauverfahren werden Arbeitsgerüste für die Pfeiler und das Widerlager benötigt. Das Pfeilergerüst orientiert sich an der Höhe der Pfeiler, das Gerüst für die Widerlager an deren Breite und Höhe.

Für die Herstellung der Kappen stehen Konsolgerüste und schwere Traggerüste zur Verfügung.

### 5.2.3.14 Abbruch/Instandsetzung

In Anlehnung an die ZTV-ING Teil 3 Massivbau werden die nachstehenden Instandsetzungsmaßnahmen für Überbauten aus Beton angewendet:

- Vorbereiten der Betonunterlage
- Rissverpressung
- Betonersatz<sup>428</sup>

Um Betonflächen ausreichend instand zu setzen, müssen die Flächen entsprechend der Folgeleistung vorbereitet werden. Der Beton wird mittels druckwasserstrahlen abgetragen und für den Ersatz mittels Druckluft mit festen Strahlmittel vorbereitet. Auf die vorbereitete Betonunterlage wird eine Haftbrücke aus Zementmörtel aufgetragen. Die Betoninstandsetzung erfolgt mittels kunststoffmodifiziertem Zementmörtel (PCC). Das Aufbringen von Oberflächenschutzsystemen ist im Standardraum Fahrbahnbelag integriert. Der Betonstahl erhält eine Beschichtung aus Zementleim mit Kunststoffzusatz. Die Einbaudicken unterscheiden sich je nach Zeitpunkt der Maßnahme, um zu berücksichtigen, dass eine frühere Instandsetzung kostengünstiger ist als eine Instandsetzung zum späteren Zeitpunkt, wenn der Beton schon mehr beschädigt ist. Als Bezugsfläche für die Mengenermittlung wird der Umfang der Untersicht des Überbaus angesetzt.

Für die Rissverpressung enthält der Standardraum Positionen für folgende Maßnahmen:

- Risse vorbereiten
- Tränkung mit Epoxidharz
- Epoxidharz liefern
- Risse nachbehandeln durch Abschleifen

Für Bauteile, denen eine endliche Lebensdauer zugeordnet wird und die daher während der Gesamtnutzungsdauer des Bauwerks erneuert werden müssen, werden Positionen für den Ausbau bzw. den Abbruch innerhalb dieses Standardraums integriert. Hierunter fallen – wie bereits beschrieben – Bauteile, welche nicht der Baukonstruktion zuzuordnen sind wie bspw. Fahrbahnübergänge, Lager etc. Traggerüste, welche für die Instandsetzungsarbeiten notwendig sind, werden ebenfalls in diesem Standardraum erfasst.

### 5.2.3.15 Objekteigenschaften

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die Objekteigenschaften für Brücken der einzelnen Bauteile. Diese Objekteigenschaften bestimmen maßgeblich die Konzeption des Bauwerks und beeinflussen damit auch Herstellungskosten und die zukünftigen Investitionskosten. Die detaillierten Leistungsbeschreibungen der in Tabelle 5-15 aufgeführten Standardräume können dem Anhang entnommen werden.

---

<sup>428</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.): Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 3 Massivbau – Abschnitt 4 Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen. Ausgabe 2019. S.11-28.



Standardraum	Objekteigenschaften
Erdaushub	Abmessungen Fundamente Abmessungen Widerlager Abmessungen Pfeiler
Gründung	Abmessungen Widerlager Abmessungen Pfeiler Bohrpfahlänge Durchmesser Bohrpfähle
Unterbau	Länge Widerlagerflügel Höhe Pfeiler Höhe Widerlager
Überbau	Überbaubreite Überbaulänge Abmessungen Überbau
Schutzeinrichtungen inkl. Geländer	Brückenlänge Anzahl Überbauten
Lärmschutzkonstruktionen	Brückenlänge
Fahrbahn	Brückenlänge Überbaubreite
Abdichtung	Brückenlänge Überbaubreite
Fahrbahnübergänge	Überbaubreite Anzahl Überbauten
Kappen	Brückenlänge Anzahl Überbauten
Lager	Brückenlänge Anzahl Felder Anzahl Überbauten
Entwässerung Fahrbahn	Brückenlänge Anzahl Überbauten Überbaubreite
Entwässerung Bauwerk	Höhe Bauwerk Anzahl Felder
Gerüste	Überbaulänge Brückenhöhe
Abbruch/ Instandsetzung	

Tabelle 5-15: Standardräume Brücken und dazugehörige Objekteigenschaften

### 5.2.4 Standardraumstruktur Tunnel

Entsprechend des in Kapitel 4 vorgestellten allgemeinen Rahmenmodells (vgl. Abbildung 4-12) wurden die Gegenstände des Modells am Beispiel eines Tunnels gegliedert.

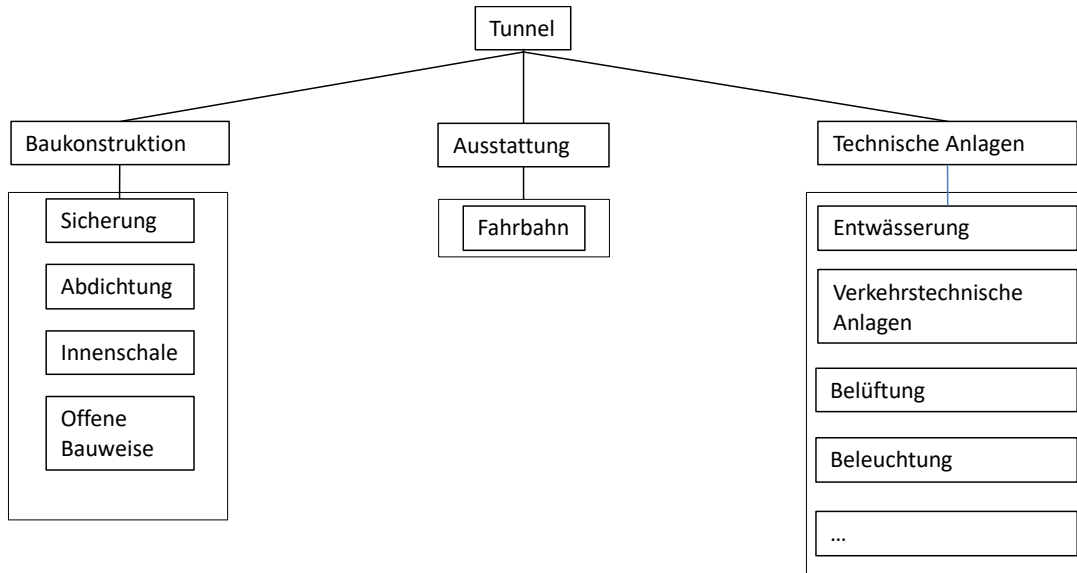


Abbildung 5-25: Aufbau der Standardraumstruktur bei Tunnelbauwerken

Durch die Standardräume werden die häufigsten Tunnelbauwerke abgebildet. Hierfür werden einige Grundannahmen getroffen. Abgebildet werden können ein- und zweiröhrige Tunnel. Einröhrige Tunnel werden mit zwei Fahrstreifen ausgebildet (Gegenverkehr), zweiröhrige Tunnel können mit maximal drei Fahrstreifen pro Röhre modelliert werden (Richtungsverkehr). Bei den Standardräumen wird zwischen der offenen und der geschlossenen Bauweise unterschieden. Die Eingabemaske der Bauwerksdaten für die Standardraumstruktur von Tunnelbauwerken ist in Abbildung 5-26 dargestellt.

Bauwerksdaten	
Objekt	Tunnel
Bauweise	<input type="radio"/> offen
	<input type="radio"/> geschlossen
Gesamtlänge	
Breite	
Anzahl Fahrspuren/ Röhre	
Anzahl Röhren	
Verkehrsstärke	

Abbildung 5-26: Eingabemaske Bauwerksdaten Tunnel

Wie auch bei Brückenbauwerken wird für eine Tiefgründung von Tunnelbauwerken keine Standardisierung vorgenommen. Für die offene Bauweise werden Standardräume für den Baugrubenverbau, die Flachgründung sowie für das Tragwerk erstellt. Bei der geschlossenen Bauweise erfolgt eine Standardisierung für die Innenschale. Die Sicherungsmittel sind auf Grund ihrer starken Abhängigkeiten von den örtlichen Gegebenheiten nicht standardisierbar.

### 5.2.4.1 Gründung

Für Tunnel in offener Bauweise kann es je nach Bodenbeschaffenheit notwendig sein, eine Tiefgründung vorzusehen. Wie bei den Standardräumen für den Brückenbau wird auch bei Tunnelbauwerken eine Tiefgründung mittels Pfahlgründung berücksichtigt. Da die Ausführungen stark von den projektspezifischen Eigenschaften abhängen, ist eine Standardisierung nicht zielführend. Durch Eingabe der entsprechenden Parameter aus Abbildung 5-18 können die Mengen und damit die Kosten berechnet werden.

Im Falle einer Flachgründung werden innerhalb des Standardraums Positionen für Sauberkeitsschicht, Fundamente aus Stahlbeton C30/37 sowie dazugehöriger Bewehrung BSt 500S vorgesehen. Für die Fundamente wird eine Dicke von 1,20 m sowie eine Breite von 3,50 m angenommen (vgl. Abbildung 5-27).

Grundannahmen Gründung	
Dicke Fundamente	Breite Fundamente
1,20 m	3,50 m

Abbildung 5-27: Grundannahmen Standardraum Flachgründung

### 5.2.4.2 Baugrubenverbau

Ein Baugrubenverbau ist nur bei Tunneln notwendig, welche in offener Bauweise erstellt werden. Innerhalb der Standardraumstruktur wird ein Baugrubenverbau mittels Stahlspundwand zugrunde gelegt. Die Mengenermittlung bezieht sich auf die Baugrubentiefe sowie die Länge der Baugrube. Die Länge der Baugrube ergibt sich aus der Länge des Tunnels. Die Tiefe der Baugrube orientiert sich an dem Lichtraumprofil des fertigen Tunnels. Dieses sollte nach RABT 4,50 m betragen. Zu dem geforderten Lichtraumprofil werden zwei Meter für die Anbringung der Strahlventilatoren addiert. Inklusiv der Dicke der Fundamente von 1,20 m und der Dicke der Decke sowie einer Überdeckung von einem Meter ergibt sich eine Baugrubentiefe von 9,70 m.

Grundannahmen allgemein		
Lichtraumprofil	Überdeckung	Raum für TGA
4,50 m	1,00 m	2,00 m

Abbildung 5-28: Grundannahmen Standardraum Baugrubenverbau

### 5.2.4.3 Offene Bauweise

Der Standardraum enthält Positionen für die Herstellung des Rahmenbauwerks, bestehend aus Decke und Wänden sowie Positionen für die Herstellung der Bodenplatte. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Länge des Tunnels sowie die lichte Höhe (4,50 m). Die Wände werden mit einer Dicke von 0,80 m ausgeführt. Für die Decke wird eine gleichbleibende Dicke von 1,00 m angesetzt. Die Höhe der Wände ergibt sich aus dem geforderten Lichtraumprofil sowie zusätzlich zwei Metern für die Anbringung von Strahlventilatoren. Es wird dabei von einer über die gesamte Länge des Tunnels gleichbleibenden Höhe der Wände ausgegangen.

Grundannahmen offene Bauweise		
Dicke Wände	Dicke Decke	Höhe Wände
0,80 m	1,00 m	6,50 m

Abbildung 5-29: Grundannahmen Standardraum offene Bauweise

#### 5.2.4.4 Erdaushub

Für den notwendigen Erdaushub bei Tunneln in offener Bauweise wird - wie bei Brückenbauwerken - als Bezugsgröße das Volumen einer beispielhaften Standardbaugrube herangezogen. Es wird von einer 1:1 geböschten Baugrube ausgegangen. Ein seitlicher Abstand von 60 cm dient hier ebenfalls als Arbeitsraum. Es wird ein Aushub der Bodenklasse 3 bis 5 zugrunde gelegt.

#### 5.2.4.5 Geschlossene Bauweise

Die geschlossene Bauweise besteht aus der Sicherung sowie einer bewehrten Innenschale aus Ortbeton. Für die Sicherung sind je nach Vortriebsklasse verschiedene Sicherungsmittel notwendig. Diese sind wie bereits erwähnt stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig, was eine Standardisierung als nicht sinnvoll erscheinen lässt. Für den Ausbruch wird einfachhalber eine über die gesamte Tunnellänge gleichbleibende Vortriebsklasse angenommen. Es wird ein Einheitspreis ermittelt, welcher einen Durchschnittspreis über die verschiedenen Vortriebsklassen darstellt. Der Querschnitt wird innerhalb des Standardraums in Kalotte, Strosse und Sohle unterteilt. So können die Kosten für den Ausbruch näherungsweise ermittelt werden.

Für den Ausbau wird von einer bewehrten Innenschale mit Sohlgewölbe ausgegangen. Die Herstellung des Sohlgewölbes wird in einer eigenen Position erfasst. Tunnel, welche in geschlossener Bauweise hergestellt werden, weisen in der Regel keinen Rechteckquerschnitt, sondern einen Gewölbequerschnitt auf. Für die Mengenermittlung muss der Umfang des Tunnels bestimmt werden. Wie bei der offenen Bauweise wird von einem späteren Lichtraumprofil von 4,50 m ausgegangen. Der Ausbruch der Strosse kann als annähernd rechteckig angesehen werden. Die Breite richtet sich nach dem Tunnelquerschnitt. Die Kalotte kann mit einem Kreisprofil mit einem Radius von 5,50 m für einen zweisepurigen Tunnel beschrieben werden. Inklusive Sohlgewölbe beträgt die Höhe des Querschnitts 9,00 m.

#### 5.2.4.6 Abdichtung

Die Abdichtung wird bei Tunneln in geschlossener Bauweise zwischen der Außenschale und der Innenschale aufgebracht (siehe Abbildung 5-30). Für die Abdichtung bei Tunnelbauwerken der geschlossenen Bauweise wird ein 30 mm dicker Abdichtungsträger aus Spritzbeton auf der Außenschale vorgesehen. Dieser ist auch bei einer wasserundurchlässigen Betonkonstruktion herzustellen. Auf dem Abdichtungsträger wird zum Schutz der Kunststoffdichtungsbahn (KDB) eine bergseitige Schutzschicht aus Geotextil angebracht.

Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung der Abdichtung dienen die Länge und Höhe des Tunnels bzw. der Radius.

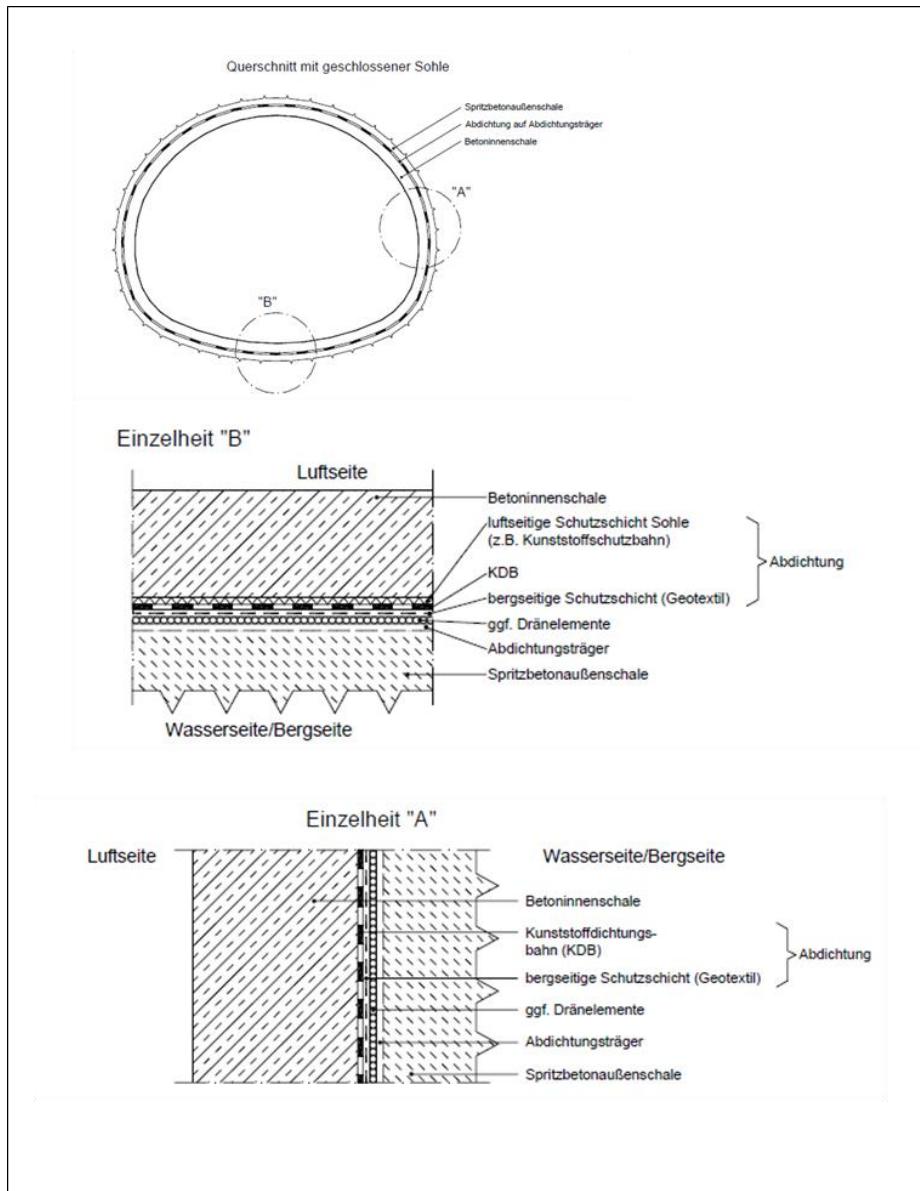


Abbildung 5-30: Ausführungsbeispiel Standardraum Abdichtung Tunnel in geschlossener Bauweise<sup>429</sup>

### 5.2.4.7 Entwässerung

Der Standardraum Entwässerung besteht aus der Entwässerung für die Fahrbahn (anfallendes Niederschlagswasser, Waschwasser, Löschwasser) und für das Bergwasser. Der Aufbau des Standardraums wurde entsprechend RIZ-ING T WAS 10 hergeleitet. Die Bergwasserdrainage wird nach ZTV-ING Teil 5 beidseitig am Ulmenfuß sowie außermittig im Sohlbereich angeordnet. Als Drainagerohre werden kreisrunde Teilsickerrohre mit einem Durchmesser  $\geq$  DN 200 hinterlegt.<sup>430</sup> Rohrverbindungen werden aus Doppelsteckmuffen ausgeführt.<sup>431</sup> Im Abstand von

<sup>429</sup> Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5, Abschnitt 5 Abdichtung. Stand 12/07. S. 4.

<sup>430</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise. Stand 12/2004. S. 25.

<sup>431</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise. Stand 12/2004. S. 25.

70 m sind Revisionsschächte der Ulmendrainage vorzusehen. Das in den Einfahrbereichen anfallende Schleppwasser sowie Löschwasser wird in einer am tieferliegenden Fahrbahnrand angeordneten Schlitzbordrinne (Klasse D400) gesammelt und in die Tunnellängsentwässerung geleitet. Hierfür sind in regelmäßigen Abständen Tauchwandschächte oder Schächte mit Siphonierung anzuordnen (Abstand 50 m). Die Leitungsrohre der Tunnellängsentwässerung weisen einen Mindestdurchmesser von 300 mm und eine Mindestneigung von 0,5 % auf.<sup>432</sup> Der Standardraum enthält die Entwässerungsausführung getrennt für die geschlossene und offene Bauweise.

Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung der Entwässerung dienen die Länge des Tunnels sowie die Anzahl der Röhren.

#### **5.2.4.8 Beleuchtung**

Der Standardraum Beleuchtung enthält Positionen für folgende Bauteile:

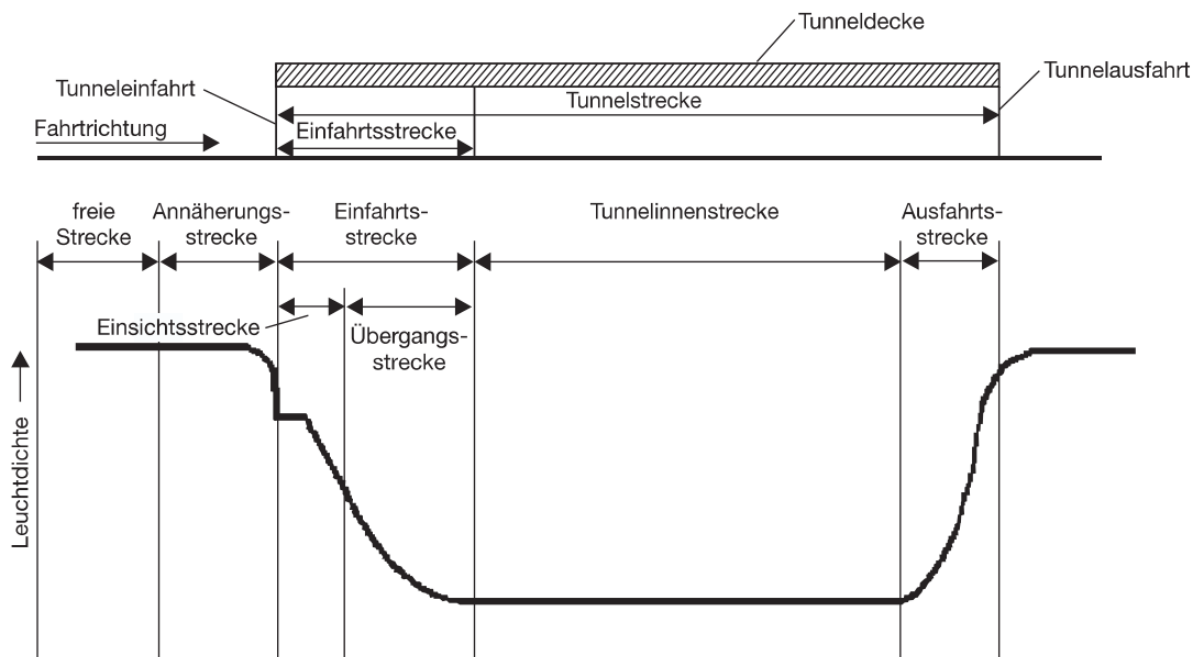
- Tunnelleuchten
- Leuchtmittel
- Messwerterfassung

Die Beleuchtung der Tunnelstrecke lässt sich nach der DIN 67524<sup>433</sup> in unterschiedliche Abschnitte einteilen (vgl. Abbildung 5-31). In der Einfahrstrecke befindet sich die Adaption Beleuchtung des Tunnels. Diese besteht aus deutlich mehr Beleuchtung als die Durchfahrtsbeleuchtung, welche auf der Tunnelinnen- und Außenstrecke angeordnet ist. Um die erforderliche Leuchtdichte der Adaption Beleuchtung zu ermitteln, befinden sich außerhalb des Tunnels Leuchtdichtekameras, die die Beleuchtungsstärke messen. Die Adaption Beleuchtung ist den stark variierenden Tageslichtverhältnissen stets anzupassen und muss hierfür in der Leuchtdichte kontinuierlich oder möglichst kleinstufig (mindestens 6 Stufen) an die tageszeitabhängigen Anforderungen angepasst werden können. Daher ergeben sich für die Adaption Beleuchtung deutlich mehr Schaltvorgänge, weshalb auch die Lebensdauer dieser Leuchtmittel geringer ist als die der Durchfahrtsbeleuchtung.

---

<sup>432</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise. Stand 12/2004. S. 26.

<sup>433</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 67524-1:2019-01: Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen. Teil 1: Allgemeine Gütekriterien und Richtwerte. Berlin 2019.



**Abbildung 5-31: Tunnelabschnitte eines lichttechnisch langen Tunnels und schematischer Verlauf der Leuchtdichte bei der Durchfahrt am Tag<sup>434</sup>**

Für die Leuchtmittel der Adaptionsbeleuchtung wurden Natriumdampfhochdrucklampen gewählt. Die zur Verfügung stehenden Projekte wurden analysiert, um ausschlaggebende Faktoren zu identifizieren. Die durchschnittliche zulässige Höchstgeschwindigkeit in deutschen Autobahntunneln beträgt 80 km/h. Da die Haltesichtweite von der Geschwindigkeit abhängig ist, wird ein konstanter Wert festgelegt. Die Länge der Einfahrtsstrecke lässt sich nicht als prozentualer Anteil an der Gesamtlänge eines Tunnels darstellen, sondern als eine feste konstante Länge unabhängig von der Tunnellänge. Die Einfahrtsstrecke kann in die Einsichts- und Übergangsstrecke unterteilt werden. Die Stärke der Beleuchtung nimmt mit zunehmender Länge ab. Daher werden in der Einfahrtsstrecke Lampen mit unterschiedlichen (abnehmender) Stärken verbaut, um die Adaption des menschlichen Auges zu gewährleisten. Bei der Anzahl der verbauten Leuchten muss zwischen Gegenverkehrs- und Richtungsverkehrstunneln unterschieden werden. Außerdem spielt die Anzahl der Fahrstreifen eine bedeutende Rolle für die Anordnung und somit für die Anzahl der Lampen. Die Einsichtsstrecke enthält für Richtungsverkehrstunnel mit zwei Fahrstreifen pro Röhre 0,4 Lampen/Meter, die Übergangsstrecke 0,2 Lampen/Meter. Bei zweiröhriigen Tunneln mit drei Fahrstreifen werden 0,7 Lampen/Meter in der Einsichtsstrecke und 0,25 Lampen/Meter in der Übergangsstrecke verbaut. Die Durchfahrtsbeleuchtung wird als Aufschaltung mit einer Lampenstärke von 70 W ausgeführt. Bei der Aufschaltung werden die Nachtleuchten 24 h am Tag durchgehend betrieben und tagsüber die Tagleuchten zusätzlich aufgeschaltet. Die Leuchten werden als Doppelleuchten ausgeführt, d.h. es wird eine Leuchte verbaut, welche mit zwei Lampen ausgestattet ist. In zweiröhriigen Tunneln mit zwei Fahrstreifen pro Röhre werden die Lampen im Abstand von 15,00 m angeordnet, bei drei Fahrstreifen pro Röhre im Abstand von 11 m. Die Anordnung der

<sup>434</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2016. S. 51.

Leuchten erfolgt an der Decke. Bei Gegenverkehrstunneln wird die Durchfahrtsbeleuchtung im Abstand von 8 m montiert. Für die Adaptionsbeleuchtung werden in der Einsichtsstrecke 0,25 Lampen/Meter und in der Übergangsstrecke 0,4 Lampen/Meter. In der Innenstrecke beträgt der Abstand der Leuchten bei Gegenverkehrstunneln 7,00 m.

Die Schaltung der Beleuchtung erfolgt über Leuchtdichtekameras. Diese werden in der Annäherungsstrecke, in der Einsichtsstrecke sowie in der Innenstrecke montiert. Hier ergeben sich konstante Mengen, die von der Anzahl der Röhren, nicht aber von der Tunnellänge abhängig sind.

#### 5.2.4.9 Belüftung

Der Standardraum Belüftung enthält Positionen für folgende Bauteile:

- Ventilatoren
- Messwerterfassung
- Rauchabzugsklappen
- Schalldämpfer

Tunnel ab einer Länge von 400 m sind mit einer mechanischen Belüftung auszustatten.<sup>435</sup> Die verschiedenen Lüftungssysteme sind in Abhängigkeit der Tunnellänge nach RABT in Tabelle 5-16 und Tabelle 5-17 dargestellt.

Tunnellänge	Lüftungsart im Brandfall
Bis 400 m	Natürliche Längslüftung
400 bis 600 m	Mechanische Längslüftung
600 bis 1.200 m	Nach Risikoanalyse: a) Mechanische Längslüftung b) Rauchabsaugung über eine große Absaugöffnung c) Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen
Ab 1.200 m	Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnung

**Tabelle 5-16: Lüftungsarten im Brandfall bei Gegenverkehr oder Richtungsverkehr mit täglich stockendem Verkehr<sup>436</sup>**

<sup>435</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S. 22.

<sup>436</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S. 22.



Tunnellänge	Lüftungsart im Brandfall
Bis 600 m	Natürliche Längslüftung
600 bis 3000 m	Mechanische Längslüftung
Ab 3.000 m	Längslüftung mit Punktabsaugung $\leq 2.000$ m oder Absaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen

**Tabelle 5-17: Lüftungsarten im Brandfall bei Richtungsverkehr mit ausnahmsweise stockendem Verkehr<sup>437</sup>**

Die Auswertung der Beispielprojekte ergab, dass der Großteil der Tunnel mit einer Längslüftung mit Strahlventilatoren ausgestattet ist. Längere Tunnel, welche im Gegenverkehr betrieben werden, sind mit einer Lüftung mit Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen ausgestattet. Die Steuerung der Belüftung erfolgt nach den Parametern der Sichttrübungseinrichtung sowie der Kohlenmonoxid- Konzentration. Um die Lüfter im Brandfall zu steuern, werden Strömungsgeschwindigkeitssensoren eingesetzt.

Die Messungen der Sichttrübung, der CO-Konzentration sowie der Strömungsgeschwindigkeit im Fahrraum liefern die wesentlichen Parameter für die Lüftungsregelung. Die Messung der Sichttrübung erfolgt an mehreren Stellen im Tunneln, mindestens alle 300 m.<sup>438</sup> Die Abstände können zur Unterstützung der Branddetektion auf 150 m verkürzt werden. Im Modell wurde entsprechend der ausgewerteten Beispielprojekte ein Abstand von 200 m angenommen. Die CO-Messwerterfassung erfolgt pro Lüftungsabschnitt einmal, während für die Strömungsgeschwindigkeit pro Lüftungsabschnitt zwei Geräte vorgesehen sind.

Generell werden bei beiden Lüftungssystemen Strahlventilatoren verbaut. Für das Lüftungssystem mit steuerbaren Absaugklappen werden zusätzlich im Lüftungskanal oberhalb des Fahrraums Axialventilatoren vorgesehen. Die Anzahl und Leistung der Ventilatoren ist dem Lüftungsgutachten zu entnehmen. Die Absaugklappen sind nach RABT alle 50 – 100 m anzuordnen, wobei die Absaugöffnungen 200 m vom Portal entfernt sein müssen.<sup>439</sup> Abbildung 5-32 zeigt die Eingabemaske für den Standardraum Belüftung.

<sup>437</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S.22.

<sup>438</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S.26.

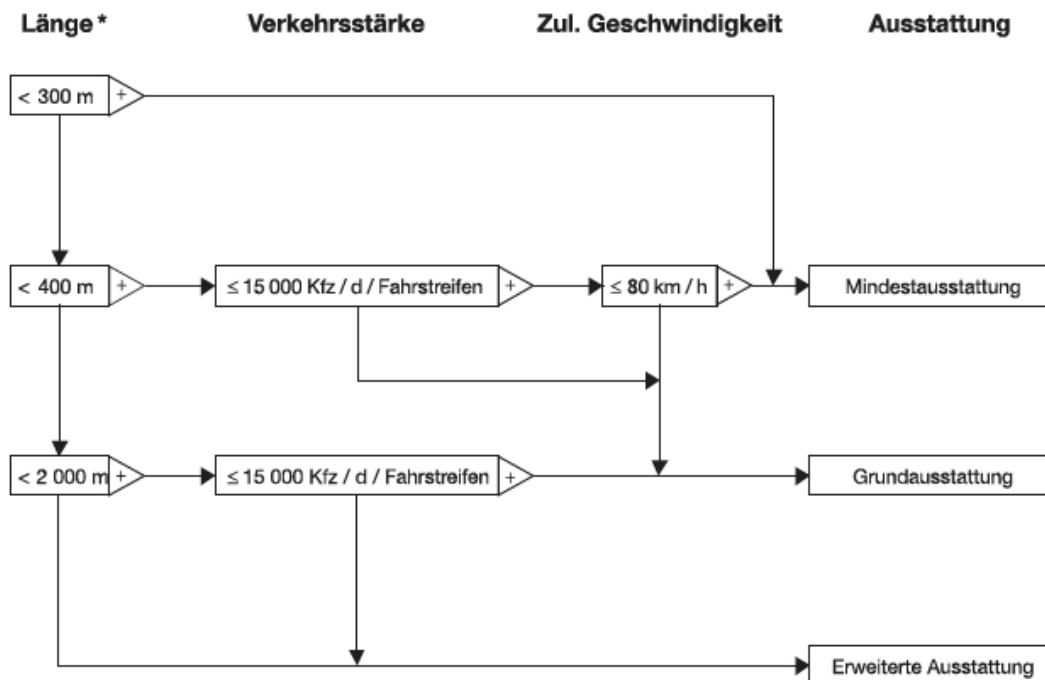
<sup>439</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S. 23.

Belüftung	
Belüftungssystem	<input type="radio"/> natürliche Längslüftung
	<input type="radio"/> mechanische Längslüftung
	<input type="radio"/> Rauchabsaugung über Zwischendecke mit steuerbaren Absaugöffnungen
Anzahl Strahlventilatoren	
Leistung Strahlventilatoren	
Anzahl Axialventilatoren	
Leistung Axialventilatoren	
Anzahl Absaugöffnungen	

Abbildung 5-32: Eingabemaske Standardraum Belüftung

### 5.2.4.10 Verkehrstechnische Anlagen

Unter den Standardraum Verkehrstechnische Anlagen fallen Verkehrszeichen, Verkehrsdatenerfassung sowie die Schrankenanlage. Die Verkehrsdatenerfassung besteht aus einer Induktivschleife, welche in der Fahrbahn verlegt ist. Die Ausstattung des Tunnels mit Verkehrszeichen richtet sich nach der Länge, dem Verkehrsaufkommen und der Geschwindigkeit und kann in eine Mindestausstattung, Grundausstattung und erweiterte Ausstattung unterschieden werden. Die Wahl der geeigneten Ausstattung erfolgt auf Basis von Abbildung 5-33:



\* Tunnellänge, gegebenenfalls auch Länge einer Tunnelkette

Abbildung 5-33: Ermittlung der verkehrstechnischen Tunnelausstattung nach RABT<sup>440</sup>

<sup>440</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S. 27.

Die Anzahl der verschiedenen Verkehrszeichen orientiert sich an den verschiedenen Ausstattungsstandards nach der RABT. Somit ist bspw. die Schrankenanlage nur Teil des Standardraums, wenn der Tunnel mit einer Grundausstattung oder erweiterter Ausstattung ausgestattet wird.<sup>441</sup> Innerhalb der Mindestausstattung sind innerhalb des Tunnels keine Verkehrszeichen vorgesehen. Als Bezugsgröße für die Verkehrsausstattung dienen die Tunnellänge sowie die Anzahl der Röhren.

#### 5.2.4.11 Notrufeinrichtungen

Der Standardraum Notrufeinrichtungen enthält Positionen für die Notrufstation, den Stationenausbau sowie für das Notrufsystem.

Notrufräumen sind ab einer Tunnellänge von 400 m in regelmäßigen Abständen von  $\leq 150$  m vorzusehen und müssen auf Grund der Schallisolation begehbar ausgebildet sein. An den Tunnelportalen, am Ende eines Rettungsstollens und in Zwischenaufenthaltsbereichen sind Notrufsprechstellen erforderlich.<sup>442</sup> Wesentliche Parameter dieses Standardraums sind demzufolge die Tunnellänge sowie die Röhrenanzahl. Oberhalb der Notrufräumen sind Notruflinien mit unten angebauter Warnleuchte vorzusehen. In neueren Tunneln sind außerdem Notrufmelder für behinderte Personen verbaut. Daher wurde diese Position mit in den Standardraum aufgenommen, auch wenn die RABT dies nicht vorschreibt. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Tunnellänge und die Anzahl der Röhren.

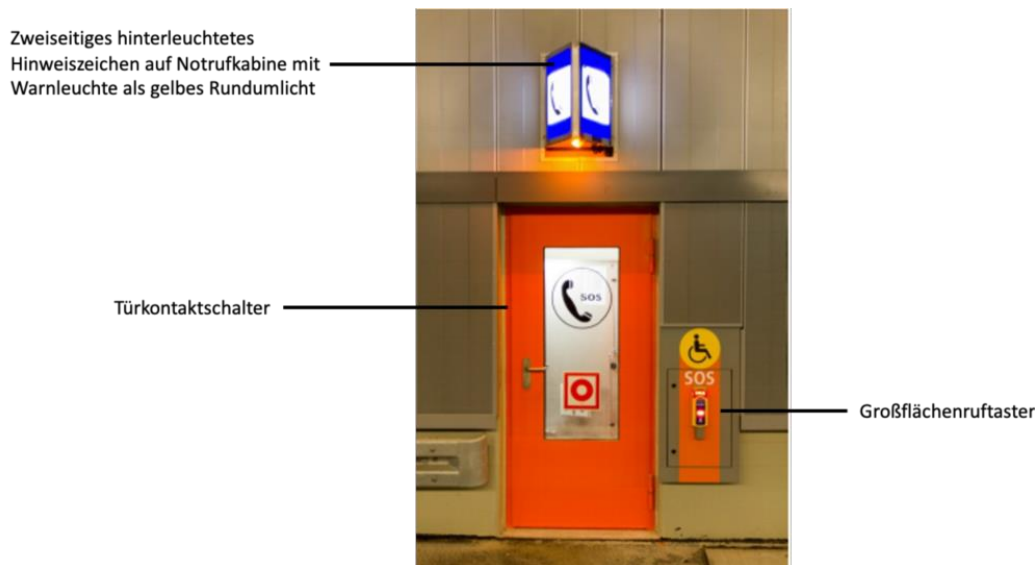


Abbildung 5-34: Notrufstation

#### 5.2.4.12 Videoüberwachung

In diesem Standardraum werden Positionen für Videokameras im Tunnel, im Vorfeld und (falls vorhanden) im Rettungsstollen integriert. Positionen für Einbauteile in Schaltschränken sind

<sup>441</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S. 30.

<sup>442</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006. S. 36.

ebenfalls in diesem Standardraum enthalten. Videokameras werden an den Portalen sowie im Inneren des Tunnels ab einer Länge von 400 m gemäß RABT in Abständen von 75 – 150 m angeordnet.<sup>443</sup> An den Tunnelportalen werden in der Regel schwenkbare Infrarot-Kameras verbaut, im Tunnelinneren feststehende Farb CCD-Kameras. Die Einbauteile für die Schaltschränke der Videoanlage sind ebenfalls in diesem Standardraum enthalten. Die Auswertung der Videobilder erfolgt ereignisorientiert auf Monitoren in einer ständig besetzten Überwachungsstelle. Die Monitore werden unter dem Standardraum „Steuerung und zentrale Leittechnik“ erfasst. Die Energieversorgung der Tunnelkameras erfolgt von den Notrufräumen ausgehend. Die Übertragung der analogen Videobilder in die Betriebsstation erfolgt mittels LWL-Leitungen. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Tunnellänge und die Anzahl der Röhren.

#### **5.2.4.13 Lautsprecheranlage**

Innerhalb des Standardraums Lautsprecheranlage werden Positionen für die Lautsprecheranlagen im Tunnel, im Vorfeld und im Rettungsstollen sowie für Messungen und Gutachten hinterlegt. Lautsprecheranlagen sind in Tunnel einzubauen, welche videoüberwacht sind.<sup>444</sup> Die RABT gibt keine Abstände der Lautsprecher vor. Für eine optimale Schallverteilung ist vor der Installation der Lautsprecheranlage eine schalltechnische Untersuchung durchzuführen, welche die Positionierung der Lautsprecher im Tunnel vorgibt. Für den Standardraum wurde gemäß der Auswertung der Referenzprojekte ein Abstand der Lautsprecher von 50 m festgesetzt. Der Standardraum beinhaltet auch Positionen zu den Gutachten und Parametrierungen. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Tunnellänge und die Anzahl der Röhren.

#### **5.2.4.14 Brandmeldeanlage**

Brandmeldeanlagen können in automatische sowie manuelle Brandmeldeanlagen unterschieden werden und sind ab einer Tunnellänge von 400 m vorzusehen (automatische Brandmeldeanlage bei Tunneln mit mechanischer Lüftung). Druckknopfmelder sind an jeder Notrufräume innen und außen anzuordnen sowie bei jeder Feuerlöschentnahmestelle.<sup>445</sup> In den Notrufräumen im Tunnel sind als Brandmeldeanlage Multisensormelder an der Decke verbaut. Die Tunnelröhre selbst ist mit einer linienförmigen Brandmeldeanlage, bestehend aus einem Sensorkabel mit Auswerteeinheit, ausgestattet. Zur Branddetektion sind Sichttrübenmessgeräte heranzuziehen. Diese werden als Rauchansaugsysteme ausgeführt. Der Standardraum enthält ebenfalls Positionen für Feuerwehrrichtungs- und Bediensysteme an den Portalen. Das Sensorkabel ist an der Tunneldecke montiert und in mehrere Abschnitte unterteilt, so dass bei Ausfall eines Abschnittes die Übrigen weiterhin funktionieren. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Tunnellänge und die Anzahl der Röhren.

---

<sup>443</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 37.

<sup>444</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 39.

<sup>445</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 39.

### 5.2.4.15 Löscheinrichtungen

Zu den Löscheinrichtungen zählen Handfeuerlöscher sowie Löschwasserleitungen. Handfeuerlöscher sind an jeder Notrufstation in zweifacher Ausführung zu montieren. Löschwasserleitungen werden in der Regel aus duktilem Gusseisen mit einem Durchmesser von DN 150 unter der Fahrbahn verbaut. Löschwasserentnahmestellen werden bei den Notrufstationen auf der gegenüberliegenden Seite und an den Portalen angeordnet.<sup>446</sup> Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Tunnellänge und die Anzahl der Röhren.

### 5.2.4.16 Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung

Die Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung ist ab einer Tunnellänge von 400 m erforderlich und wird gemäß der RABT innerhalb des Standardraums am Notgehweg auf der Seite der Notausgänge angeordnet. Die Fluchtwegkennzeichnung und Orientierungsbeleuchtung werden kombiniert in einer Leuchte ausgeführt und alle 25 m angeordnet. Eine solche Leuchte, wie sie in diesem Standardraum beschrieben wird, ist in Abbildung 5-35 dargestellt. Zur Ergänzung der Orientierungsbeleuchtung dienen selbstleuchtende Markierungselemente, welche auf beiden Seiten der Fahrbahnen auf dem Notgehweg angebracht werden.<sup>447</sup>

Ebenfalls in den Standardraum aufgenommen, wird die visuelle Ausstattung der Fluchttüren. Diese werden alle 300 m angeordnet und mit einer umlaufenden Fluchttürbeleuchtung aus grünen Leuchtelementen ausgestattet. Sie sind durch ein Fluchtwegsymbol mit einer weißen Blitzleuchte zu kennzeichnen. Das Fluchtwegsymbol ist auf beiden Seiten der Fluchttür anzubringen, weshalb dieses im Standardraum mit zwei multipliziert wird. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Tunnellänge und die Anzahl der Röhren.

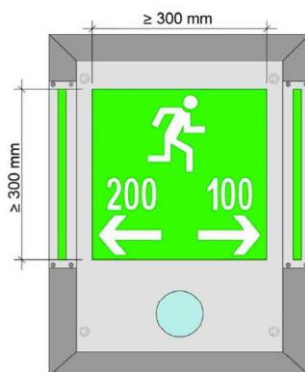


Abbildung 5-35: Kombinierte Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung<sup>448</sup>

### 5.2.4.17 Tunnelfunk

Die Tunnelfunkanlage soll die Kommunikation von Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) sowie der betrieblichen Straßenunterhaltung als auch den Straßennutzern (Rundfunk) sicherstellen. Der Aufbau der Tunnelfunkanlage ist in Abbildung 4 13

<sup>446</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 40.

<sup>447</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 40.

<sup>448</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 40.

dargestellt. Das Strahlungskabel zum Empfangen und Aussenden der Signale ist an der Tunneldecke montiert und gegen Herabfallen im Brandfall gesichert. Tunnel werden „unabhängig von den baulichen und örtlichen Gegebenheiten“<sup>449</sup> mit einer Funkversorgung ausgestattet, welche die komplette Versorgung mit BOS-Funk sicherstellt und im Notfall das Einsprechen in die UKW-Frequenzen erlaubt. Die Funkanlage besteht aus zweiseitig eingespeisten Strahlerkabel (Leckkabel). Die Versorgung der Tunnel-Portalbereiche wird durch Antennen sichergestellt, welche außerhalb des Tunnels angebracht werden. Die Tunnelfunkanlage des Standardraums besteht aus

- Zwei analogen Funkkanälen in 2-m Band RS 1 Relais
- Zwei analogen Funkkanäle im 4-m Band
- Digitaler BOS-TETRA Funkversorgung, für alle BOS nutzbar
- UKW

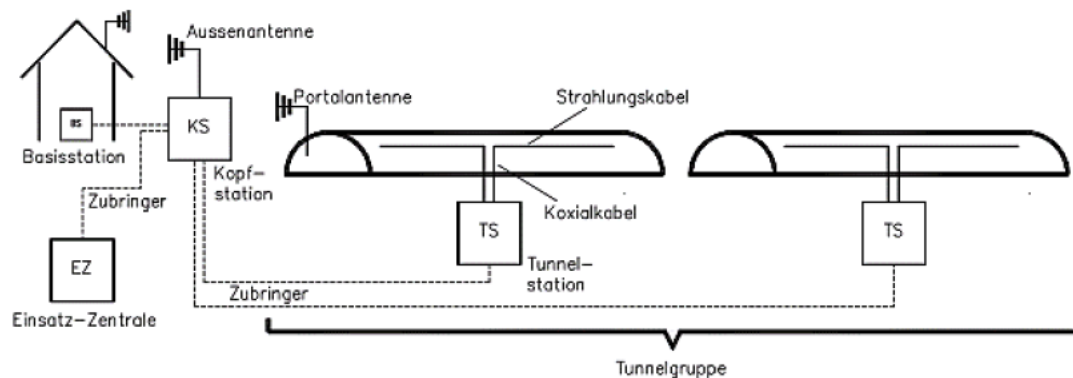


Abbildung 5-36: Darstellung der Bauteile einer Tunnelfunkanlage<sup>450</sup>

Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dient die Tunnellänge. Für einige Bauteile ergeben sich konstante Mengen, die von der Anzahl der Röhren, nicht aber von der Tunnellänge abhängig sind.

#### 5.2.4.18 Energieversorgung

Bei der Stromeinspeisung kann zwischen Mittelspannungs- und Niederspannungsanlagen unterschieden werden. Die technischen Anlagen im Tunnel werden mit Niederspannung betrieben. Somit muss der Strom bei der Einspeisung über die Mittelspannungsanlage mithilfe von Transformatoren auf Niederspannung umgewandelt werden. Die Einspeisung erfolgt in jedem Fall über einen Ring oder zwei direkte Leitungen, so dass bei Ausfall einer Leitung die Versorgung über die andere Seite des Rings bzw. über die andere Leitung gewährleistet werden kann. Die Versorgungsbereiche im Tunnel sind in Abschnitte von maximal 300 m zu unterteilen. In der Regel werden in den Notrufstationen Unterverteilungen angeordnet. Zu den Niederspannungsleitungen wird auch die separat verbaute Blindstrom-Kompensationsanlage gezählt. In Wechsel- und Drehstromnetzen entsteht neben dem Wirkstrom auch unerwünschter

<sup>449</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 37.

<sup>450</sup> Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Richtlinie Funkssysteme in Straßentunneln, 2007, S.19.

Blindstrom, welcher im Netz zwischen Verbraucher und Erzeuger hin und her pendelt und dabei Spannungsabfälle auf den Leitungen und Stromwärmeverluste erzeugt. Folglich ist darauf abzielen möglichst wenig Blindstrom auf den Leitungen zu haben. Einige Verbraucher wie Transformatoren und Motoren benötigen jedoch diese (induktive) Blindleistung. Um diese Blindleistung aus den Leitungen auszugrenzen und dagegen direkt am Verbraucher zu bündeln, werden Kompensationsanlagen verbaut.<sup>451 452</sup>

Im Falle eines Netzausfalles sind sicherheitsrelevante Anlagen über eine statische Wechselrichter- und Batterieanlage (USV-Anlage) zu versorgen. Die eigentliche Stromversorgung der USV-Anlage erfolgt über die Batterieanlage, die meist als Bleiakkulatorenanlage ausgeführt ist. Diese muss nach der RABT die Dauer für die Räumung des Tunnels überbrücken können und mindestens eine Betriebszeit von 15 Minuten aufweisen können (für die Tunnelsperranlage sogar 60 Minuten). Es müssen dabei die Funktionen der folgenden Verbraucher aufrechtgehalten werden:

- Fluchtwegkennzeichnung
- Orientierungsbeleuchtung
- Notbeleuchtung
- Rettungswegbeleuchtung
- Beleuchtung Betriebsräume
- Verkehrstechnische Einrichtungen
- Kommunikationseinrichtungen
- Brandmeldeanlage
- Steuerungseinrichtungen
- Messeinrichtungen <sup>453</sup>

Der Standardraum Energieversorgung enthält neben der Mittelspannungs- und eine Niederspannungsversorgung folgende Bauteilebenen:

- USV-Anlage
- Blitzschutz
- Brandschutz

Tunnel enthalten heutzutage aus Gründen der Ausfallsicherheit zwei redundante Transformatoren, von denen im Normalfall immer nur einer in Betrieb ist. Für die Mittelspannungsanlage wurden das Mittelspannungseinspeisefeld (Feld 1+2), das Übergabe-/ Messfeld (Feld 3+4), das Leistungsschalterfeld (Feld 5) und das Trafoabgangsfeld (Feld 6+7) mit dementsprechendem Zubehör als Standard festgelegt.

---

<sup>451</sup> Vgl. Plaßmann, Wilfried, Schulz, Detlef (Hrsg.): Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 6. neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden 2013, S. 909 – 910.

<sup>452</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2016, S. 43.

<sup>453</sup> Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Köln 2006, S. 44

Die Verbraucher werden alle niederspannungsseitig versorgt. Die Niederspannungsanlage besteht u.a. aus Leistungsschalter, NH-Trennerleisten, NH-Trenner, Überspannungsschutz-Ableiter und Leitungsschutzschalter. Durch die Platzierung der Elektrounterverteiler in den Notrufrischen fällt im Ereignisfall nur der Bereich zwischen zwei Notrufräumen aus (ca. 150 m). Somit wird die RABT-Forderung von maximalen Abschnitten von 300 m erfüllt.

#### **5.2.4.19 Steuerung**

Ziel der Steuerungstechnik ist es, die technischen Anlagen im Tunnel automatisch zu steuern und zu überwachen. Diese Aufgabe übernehmen speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und Prozessleitsysteme. Um das zuverlässige Zusammenwirken aller Anlagenteile sicherzustellen, müssen alle Steuereinheiten über ein standardisiertes Bussystem kommunizieren können.

Die ZLT setzt sich aus den Steuerungseinheiten, dem Kommunikationssystem sowie dem Zentralen Leitreechner zusammen. Die Steuerungseinheiten nehmen die Befehle aus der übergeordneten Leittechnik auf. Sie steuern, regeln und überwachen alle angeschlossenen Systeme. Die Verbindung zum zentralen Leitreechner wird durch das Kommunikationssystem sichergestellt. Der zentrale Leitreechner ist ein logisches Rechnernetzwerk, dessen Aufgabe u.a. die Überwachung und Koordination aller technischen Anlagen im Tunnel ist. Störmeldungen werden vom zentralen Leitreechner aufgenommen und dementsprechende Notprogramme gestartet.

Es ist anzumerken, dass die aktuelle Fassung der RABT aus dem Jahr 2006 in der Steuerungstechnik nicht mehr dem Stand der Technik entspricht. Zum Beispiel gibt die RABT als Kopplungssystem PROFIBUS FMS vor, während gegenwärtig aber andere Möglichkeiten wie z.B. der Ethernet-Bus realisiert werden. Zum anderen sind die Steuerungsaufgaben in der RABT 2006 veraltet. Die einzelnen Steuereinheiten sind demnach einfach und ohne Ausfallsicherheiten auszuführen. Heutzutage werden jedoch alle Steuerungen der Systeme durch hochverfügbare SPS immer redundant ausgeführt.<sup>454</sup>

Innerhalb des Standardraumes „Steuerung“ befinden sich sämtliche Bauteile, welche der Steuerung und zentralen Leittechnik zugeordnet werden können. Hierunter fallen neben den Steuerungskomponenten selbst auch die Software und Hardware der Zentralen Leittechnik sowie das aktive und passive Netzwerk. Die Komponenten des Standardraums Steuerung sind weitgehend unabhängig von den Randbedingungen des Tunnelbauwerks. Die Übertragungseinheiten richten sich nach den Einrichtungen im Tunnel. Beispielsweise richtet sich die Anzahl der Übertragungseinheiten Notrufrische nach der Anzahl der im Tunnel vorhandenen Notrufräume. Die Mengen für Hardware und Software richten sich nach der Anzahl vorhandener zum Tunnel gehöriger Betriebsgebäude.

#### **5.2.4.20 Verkabelung**

Wie bereits im Standardraum der Energieversorgung beschrieben, befinden sich in den Notrufrischen Elektrounterverteiler, von denen aus die jeweiligen Verbraucher versorgt werden. Die Verkabelung innerhalb der Standardräume wird als Längsverkabelung mit Erdkabeln unter den Notgehwegen im Leerrohrsystem realisiert. In den Abschnitten zwischen zwei Notrufräumen erfolgt die Verkabelung in Leerrohren in den Tunnelwänden oder auf Kabeltrassen an der

---

<sup>454</sup> Vgl. Eismann, Klaus: Steigerung der Tunnelsicherheit durch Erneuerung der Tunnelsteuerung. In: Tunnel 02/2011.



Tunneldecke. Die Beleuchtung wird von den Betriebsgebäuden aus sternförmig verkabelt. Sie wird so realisiert, dass im Ereignisfall nur jede dritte Leuchte ausfällt. Die Verkabelung der Notbeleuchtung erfolgt im Funktionserhalt F90. Die Verkabelung der Ventilatoren erfolgt ebenfalls von den Betriebsstationen ausgehend unter dem Notgehweg mit Erdkabeln. Die Orientierungs- und Fluchtwegbeleuchtung wird über die USV-Schiene versorgt. Sie ist einzeln verkabelt und wird von den Notrufräumen aus versorgt. Lautsprecher sind einzeln verkabelt.

#### **5.2.4.21 Fahrbahn**

Die Ausstattung des Standardraums Fahrbahn orientiert sich an den Vorgaben der RStO. Der Aufbau der Fahrbahn besteht aus einer Frostschutzschicht, Asphalttragschicht, Asphaltbinderschicht und Asphaltdeckschicht. Die genauen Ausführungsmöglichkeiten sind unter dem Standardraum „Oberbau“ der Straßenverkehrswege (vgl. Kapitel 5.2.5.1.2) dargestellt. Als Bezugsgröße dienen die Tunnellänge, die Anzahl der Röhren sowie die Tunnelbreite.

#### **5.2.4.22 Kappen**

Wie bei Brücken sind auch bei Tunnelbauwerken Kappen als Notgehwege vorzusehen. Sie werden i.d.R. in Ortbetonbauweise hergestellt, befinden sich an den äußeren Rändern der Fahrbahnen und sind gemäß ZTV-Ing Abschnitt 3 Teil 1 auszuführen.<sup>455</sup> Die Kappen müssen sich mindestens 3 cm oberhalb der Fahrbahn befinden und sind nach der RABT durch Hochborde mit einer Höhe von 7 cm von der Fahrbahn begrenzt.<sup>456</sup> Weiter gibt die RABT an, Notgehwege mit einer Breite von 1,0 m und einer lichten Durchgangshöhe von 2,25 m herzustellen.<sup>457</sup> Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung der Kappen dienen die Tunnellänge sowie die Anzahl der Röhren.

#### **5.2.4.23 Abbruch/ Instandsetzung**

Wie bei Brückenbauwerken (vgl. Kapitel 5.2.3.14) wird auch bei Tunnelbauwerken ein Standardraum für den Abbruch und Ausbau von Bauteilen sowie die Instandsetzung von Betonbauteilen ergänzt. Der Aufbau des Standardraums kann Kapitel 5.2.3.14 entnommen werden.

#### **5.2.4.24 Objekteigenschaften**

Die nachfolgenden Tabellen fassen die generierten Standardräume mit deren Objekteigenschaften für Tunnel zusammen. Die Objekteigenschaften lassen sich über einzelne Bauteile sowie deren Mengen beschreiben. Die detaillierten Leistungsbeschreibungen der in Tabelle 5-18 und Tabelle 5-19 aufgeführten Standardräume können dem Anhang entnommen werden.

---

<sup>455</sup> Vgl. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, Stand 2014/12, S. 29.

<sup>456</sup> Vgl. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise, Stand 2014/12, S. 29.

<sup>457</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (Hrsg.): RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Ausgabe 2006, S. 35.

Standardraum/ Funktionseinheit	Objekteigenschaften
Gründung	Tunnellänge
Baugrubenverbau	Tunnellänge
Offene Bauweise	Tunnellänge Lichte Höhe Anzahl Röhren
Erdaushub	Tunnellänge Querschnitt Lichte Höhe
Geschlossene Bauweise	Tunnellänge Querschnitt Anzahl Röhren
Abdichtung	Tunnellänge Tunnelhöhe
Entwässerung	Tunnellänge Anzahl Röhren
Kappen	Tunnellänge Breite Kappen
Fahrbahn	Querschnitt Tunnellänge Anzahl Röhren
Beleuchtung	Länge Einfahrtsstrecke Verkehrsaufkommen Querschnitt Tunnellänge Anzahl Röhren
Belüftung	Tunnellänge Anzahl Röhren Lüftungsgutachten
Verkehrstechnische Anlagen	Tunnellänge Anzahl Röhren
Notrufeinrichtungen	Tunnellänge Anzahl Röhren
Videoüberwachung	Tunnellänge Anzahl Röhren
	Tunnellänge Anzahl Röhren
Tunnelfunkanlage	Tunnellänge
Lautsprechanlage	Tunnellänge Anzahl Röhren
Brandmeldeanlage	Tunnellänge Anzahl Röhren
Löscheinrichtungen	Tunnellänge Anzahl Röhren
Verkabelung	Tunnellänge Anzahl Röhren
Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung	Tunnellänge Anzahl Röhren
Abbruch/ Instandsetzung	

**Tabelle 5-18: Standardräume Tunnel und dazugehörige Objekteigenschaften**

Die Standardräume „Energieversorgung“ und „Steuerung“ enthalten Bauteile, welche unabhängig von den Objekteigenschaften in einer festgelegten Anzahl vorkommen. Für Bauteile dieser Standardräume wird daher die Anzahl festgelegt. Ausnahme bildet die Verkabelung. Diese ist abhängig von den Objekteigenschaften Tunnellänge und Röhrenanzahl.

Standardraum/ Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil	Anzahl
Energieversorgung	Mittelspannungsanlage	Gießharztransformator	2
		Öl- Verteilungstransformator	
		MS-Einspeisefeld	1
	Niederspannungsanlage	Ausbauteile	1
		Schaltschränke	1
		Schaltschränke-Dachlüfter	1
		Kompensationsanlage	1
	USV-Anlage	USV-Anlage	1
Batterieanlage		1	
Steuerung und ZLT	Software	Hochverfügbare SPS	1
		SPS-Steuerung	1
		BUS-System	1
		Steuerungssoftware	1
		Zentraler Leitrechner	1
	Hardware	Hardware	1

Tabelle 5-19: Standardräume Energieversorgung und Steuerung

## 5.2.5 Standardraumstruktur Verkehrswege

### 5.2.5.1 Straßen

Abbildung 5-37 zeigt das Rahmenmodell der Standardraumstrukturen für Straßen.

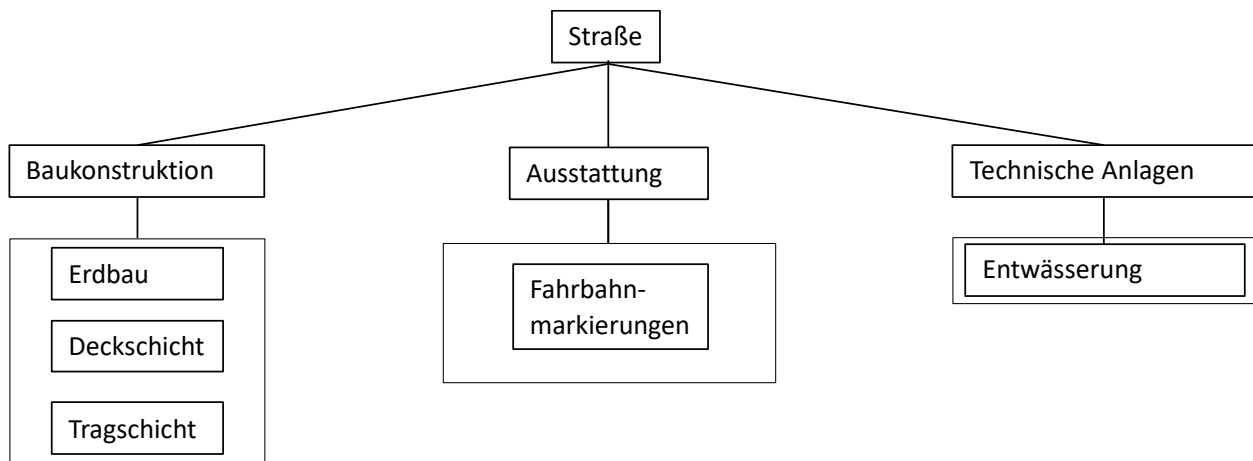


Abbildung 5-37: Aufbau der Standardraumstruktur für Straßen

Die Standardraumstrukturen sollen einen Großteil der möglichen Konstruktionen abbilden. Auf Basis der Verteilung der Deckschichtarten in Deutschland (vgl. Abbildung 5-38) sowie der Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus werden Standardräume für Asphaltdecken sowie Betondecken entwickelt. Deckschichten mit offenporigem Asphalt werden aufgrund ihres geringen Anteils nicht berücksichtigt.

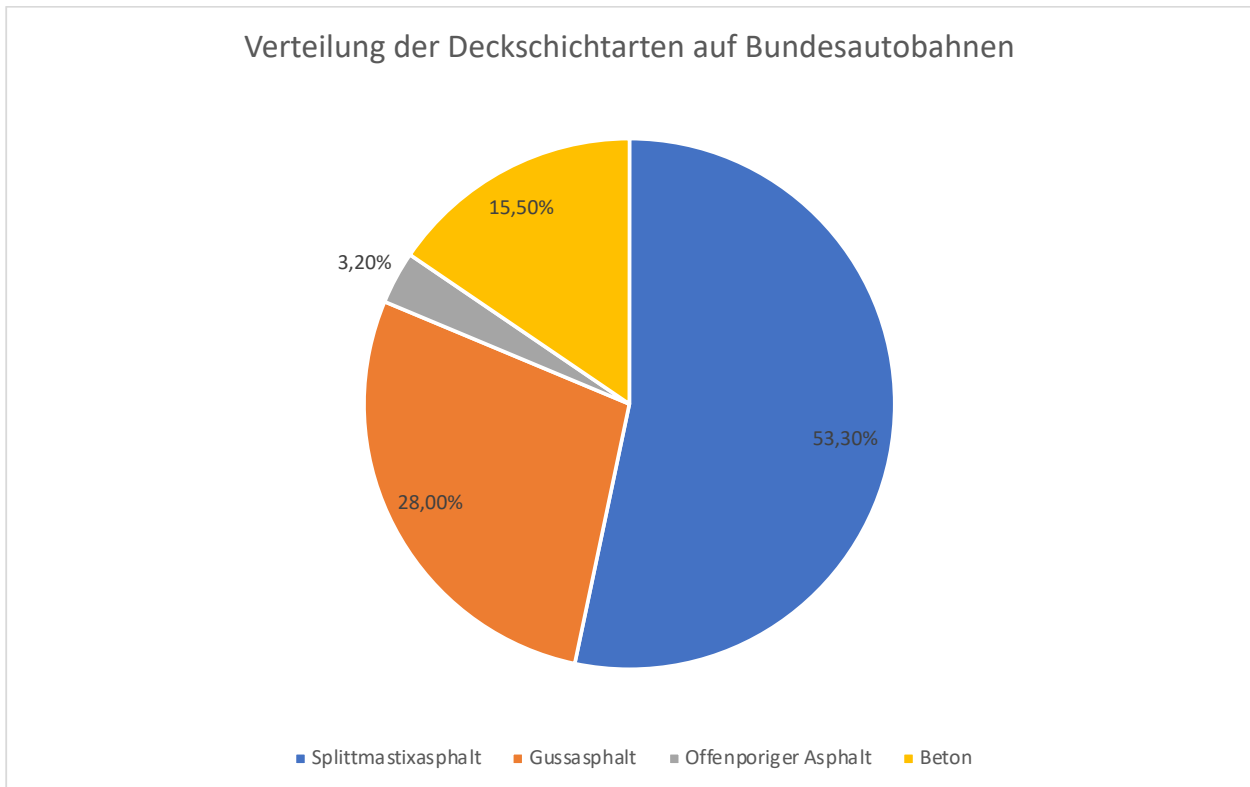


Abbildung 5-38: Übersicht über die Deckschichtarten auf Bundesautobahnen

Die Eingabemaske der Bauwerksdaten für die Standardraumstruktur von Tunnelbauwerken ist in Abbildung 5-39 dargestellt.

Eingaben	
Straßenquerschnitt	
Länge [m]	
Oberbaumaterial	
Schichtart Asphalt	
Deckschicht Asphalt	
Schichtart u. Deckschicht Beton	
Frostempfindlichkeitsklasse	
Anfang- und Endkonstruktion	
Schutzeinrichtung [Stk]	
Standstreifen (bei Abweichung von RQ) [Stk]	

Abbildung 5-39: Eingabemaske Standardraum Straßenverkehrsweg

### 5.2.5.1.1 Erdarbeiten

Der Erdbau ist aufgrund vieler projektspezifischer Einflussfaktoren nicht standardisierbar. Es müssen daher einige Annahmen getroffen werden. Für den Standardraum wird ein Aushub der Bodenklassen 3-5 angenommen. Positionen für Verbesserungsmaßnahmen sowie einer Trennschicht aus Geotextilien werden innerhalb des Standardraums aufgenommen. Es wird davon ausgegangen, dass der Oberboden mit einer mittleren Dicke von 20 cm abgetragen wird. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dienen die Länge der Fahrbahn und der Querschnitt inkl. Bankette. Die Menge der zu bewegenden Erdmasse ist außerdem abhängig von der erforderlichen Dicke der Frostschutzschicht. Hierfür ist die Angabe der Frosteinwirkungszone

erforderlich.<sup>458</sup> Positionen für Rasen- und Saatarbeiten befinden sich ebenfalls in diesem Standardraum.

#### **5.2.5.1.2 Oberbau**

Der Standardraum Oberbau enthält Positionen für das Herstellen der Bankette, des Planums sowie der Deck- und Tragschicht. Für Deck- und Tragschichten werden mehrere Ausführungsmöglichkeiten erstellt. Die Dimensionierung ist abhängig von der Entwurfsklasse, welche sich aus der Straßenkategorie ergibt. Für jede Straßenkategorie wird eine Ausführung mittels Betondecke und eine Ausführung als Asphaltdecke gemäß RStO<sup>459</sup> zu Grunde gelegt. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung des Oberbaus dient der Regelquerschnitt sowie die Länge des Streckenabschnitts. Für die Bankette wird gemäß der „Richtlinie für die Anlage von Autobahnen“ (RAA) eine Breite von 1,50 m festgelegt.<sup>460</sup>

Aufgrund des Schwerlastverkehrs, welcher sich hauptsächlich auf den rechten Fahrspuren von Bundesautobahnen konzentriert, besteht die Möglichkeit, dass diese aufgrund der erhöhten Nutzungsintensität (vgl. Kapitel 5.3.3) im Gegensatz zu den linken Fahrstreifen eine geringere Lebensdauer haben und bei Instandsetzungsmaßnahmen lediglich der äußerste Fahrstreifen erneuert wird. In diesem Fall ist als Breite nicht die gesamte Fahrbahnbreite, sondern nur die Breite des zu erneuernden Fahrstreifens in den Standardraumstrukturen anzusetzen.

#### **5.2.5.1.3 Ausstattung**

Dieser Standardraum umfasst die Bauteile Fahrbahnmarkierungen, Leiteinrichtungen sowie Fahrzeug-Rückhaltesysteme. Diese werden in Abhängigkeit der Straßenkategorie berücksichtigt. Grundlage für die Erstellung des Standardraums sind die StVO Anlage 4 zu §43 Absatz 3 Leiteinrichtungen sowie die Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme (RPS)<sup>461</sup>. Als Bezugsgröße für die Mengenermittlung dient die Länge der Strecke.

#### **5.2.5.1.4 Entwässerung**

Der Standardraum Entwässerung enthält Positionen zu Straßenabläufen inkl. Formstücke, Aufsätze und Anschlussleitungen, Entwässerungsleitungen und Schlitzrinnen. Als Bezugsgröße dient die Länge des Streckenabschnittes sowie der Querschnitt. Gemäß der Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung wird eine Einzugsfläche von 400 m<sup>2</sup> zu Grunde gelegt.<sup>462</sup>

---

<sup>458</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen. Ausgabe 2012. Bonn 2013.

<sup>459</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsgruppe „Infrastrukturmanagement“: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen. Ausgabe 2012. Bonn 2012, S. 16.

<sup>460</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Ausgabe 2008. Bonn 2009. S. 20.

<sup>461</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme – RPS, Ausgabe 2009. Bonn 2010, S. 7.

<sup>462</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung – RAS-Ew. Ausgabe 2005. Bonn 2005. S. 18.

### 5.2.5.1.5 Abbruch/ Instandsetzung

Wie bei Tunnel- und Brückenbauwerken (vgl. Kapitel 5.2.3.14) wird auch bei Verkehrswegen ein Standardraum für den Abbruch und Ausbau von Bauteilen ergänzt. Der Aufbau des Standardraums kann Kapitel 5.2.3.14 entnommen werden.

### 5.2.5.2 Schienenwege

Standardraumstrukturen für Schienenwege konnten im Rahmen der Arbeit aufgrund fehlender Entwurfsgrundlagen und Richtlinien nur oberflächlich hergeleitet werden. Genaue Positionsbeschreibungen sowie Kostenkennwerte wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht generiert. Es wird eine Struktur für Schienenwege auf Basis der hergeleiteten Objektstruktur aus Kapitel 5.1.1.1 für die Erstellung der Standardräume vorgegeben. Das allgemeine Rahmenmodell ist in Abbildung 5-40 dargestellt.

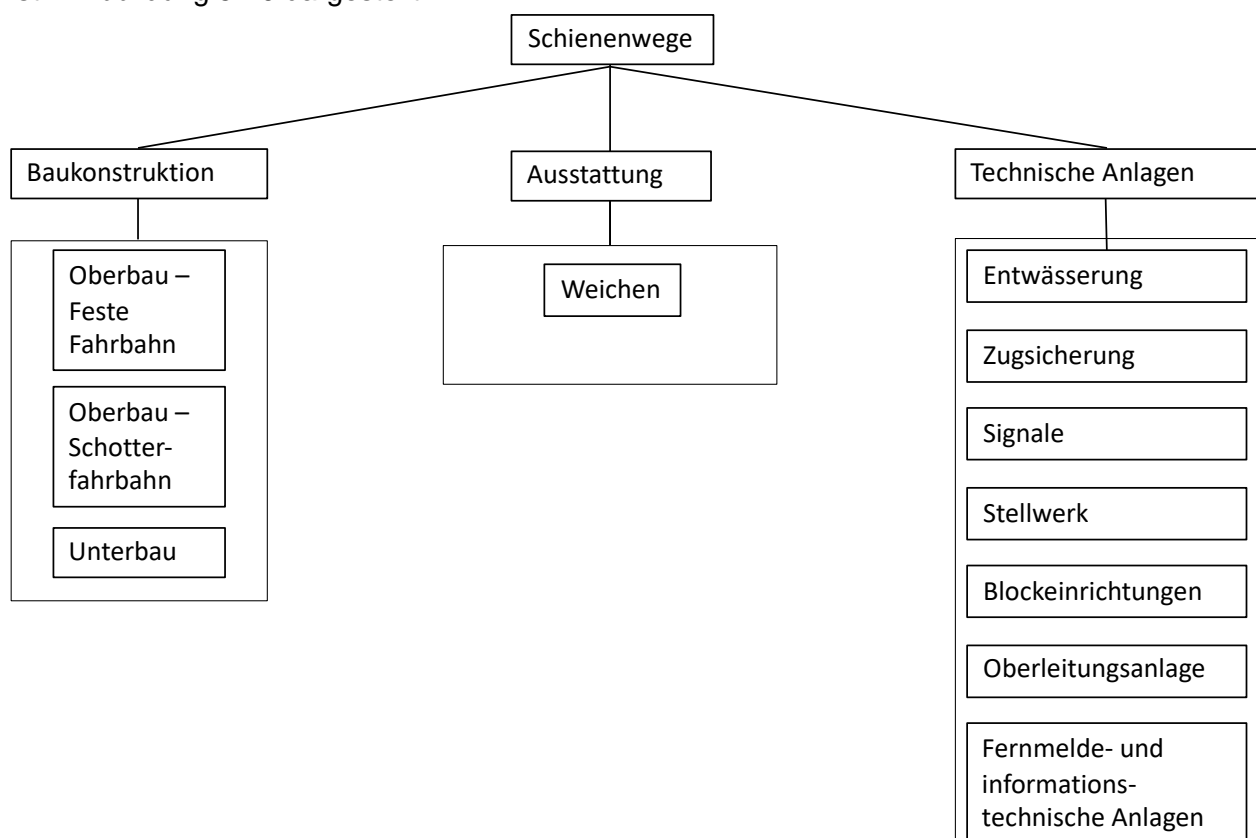


Abbildung 5-40: Aufbau der Standardraumstrukturen für Schienenwege

Auf Basis dieser Strukturierung können bei Kenntnis der notwendigen Informationen nach der gleichen Methodik wie für Straßenverkehrswege, Brücken und Tunnel die Standardräume definiert werden. Im Anhang sind die Entwürfe zu Standardraumstrukturen von Schienenwegen dargestellt.

### **5.3 Standardisierung von Einflussfaktoren zur Ermittlung der Lebensdauern**

Für die Anwendung der in Kapitel 4.3 vorgestellten Methodik zur Ermittlung der Lebensdauern ist eine strukturierte Datensammlung Voraussetzung. Mit Hilfe einer solchen Datensammlung können die Abnutzungsverläufe der einzelnen Bauteile ermittelt werden. Jedoch existieren eine Vielzahl an Einflussfaktoren, die bei der Ermittlung berücksichtigt werden müssen. Die Auswirkungen dieser Faktoren auf die Lebensdauer sind im Allgemeinen nicht bekannt und nur schwer zu quantifizieren. Daher ist eine möglichst homogene Datensammlung zu erstellen, die ähnlichen Rand- und Umgebungsbedingungen unterliegt. Um eine solche Datensammlung zu schaffen, sind zunächst alle relevanten Bauteile sowie deren Einflussfaktoren zu identifizieren und zu standardisieren.

In Kapitel 3.3.2.2 wurden die Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Bauteilen nach der DIN ISO 15686 vorgestellt. Diese Gliederung bietet eine Grundlage für die Standardisierung auf oberster Ebene. Diese Einflussfaktoren A - F sind im Hinblick auf eine Lebensdauerberechnung weiter in Subfaktoren zu unterteilen und für jedes Bauteil zu definieren, um eine Datensammlung nach der in Kapitel 4.3.2 vorgestellten Methodik zu generieren. Unter der Annahme einer gleichwertigen Komponenten- sowie Konstruktionsqualität und einer korrekten Ausführung entsprechend den geltenden Normen und Richtlinien kann unterstellt werden, dass der Zustand verschiedener Bauwerke beim Neubau nahezu identisch ist. Die Faktorgruppen A - C können daher vernachlässigt werden. Die zu berücksichtigenden Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686 werden auf folgende Gruppen reduziert:

- Faktor D: Innenräumliche Umgebungsbedingungen
- Faktor E: Außenräumliche Umgebungsbedingungen
- Faktor F: Nutzungsintensität
- Faktor G: Instandhaltungsniveau

Für die hier betrachteten Bauwerke können die innenräumlichen Umgebungsbedingungen (Faktor D) vernachlässigt werden, da es sich ausschließlich um Bauteile handelt, welche sich im Freien befinden.

#### **5.3.1 Instandhaltungsniveau**

Der Faktor G „Instandhaltungsniveau“ berücksichtigt zum einen die regelmäßige Durchführung von Instandhaltungsleistungen, wie bspw. Wartung und Inspektion, und zum anderen die angewendete Instandhaltungsstrategie. Es wird eine 100%ige Instandhaltungsqualität vorausgesetzt, d.h. die nach DIN 1076 geregelten Bauwerksprüfungen werden regelmäßig durchgeführt und dabei entdeckte Schäden kleineren Umfangs im Rahmen von Betriebsinstandsetzungen behoben. Die Instandhaltungsstrategie als ein weiterer Aspekt dieses Einflussfaktors hat einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer (vgl. Kapitel 4.3). Je nach gewählter Strategie kann sich die Lebensdauer von ein und demselben Bauteil unterscheiden. Daher ist die Strategie für ein Bauteil im Rahmen der Datensammlung zu berücksichtigen. Nach ZIEGEL und auf Basis der DIN 13306 können die folgenden vier Strategien unterschieden werden:

- Vorausbestimmte Instandhaltung
- Zustandsbestimmte Instandhaltung
- Sofortige Instandhaltung
- Aufgeschobene Instandhaltung

Die verbleibenden Faktoren „Außeneinflüsse“ sowie „Nutzungsintensität“ sind in weitere standardisierte Subfaktoren zu untergliedern und zu spezifizieren. Die Subfaktoren müssen für jedes Bauteil definiert werden. Beispielsweise wird unter dem Faktor F „Nutzungsintensität“ für das Bauteil Fahrbahnübergang die Verkehrsbelastung verstanden. Für die Beleuchtung im Tunnel bspw. wird unter Nutzungsintensität die Anzahl von Schaltvorgängen verstanden.

### 5.3.2 Außeneinflüsse

Für die Faktorklasse Außeneinflüsse werden gemäß Kapitel 3.3.2.2 folgende Faktoren berücksichtigt:

- Hitze (nur bei Deckschichten aus Asphalt)
- Tausalzeinsatz
- Niederschlag/Feuchtigkeit
- Frost
- Wind

Die Einflussfaktoren werden anhand von Parametern beschrieben und quantifiziert. Die Parameter sind so zu wählen, dass sie möglichst messbar sind und die Stärke des Einflusses des Faktors beschreiben.

#### Wind

Durch Wind werden mechanische Spannungen an Bauwerken hervorgerufen. Je stärker der Wind, desto größer sind die Belastungen für die Bauteile. Die Windstärke dient daher als Parameter für die Einteilung der Cluster. Eine Unterteilung der verschiedenen Regionen in Deutschland entsprechend ihrer Windstärken nimmt der nationale Anhang des Eurocodes 1 „Einwirkungen auf Tragwerke“<sup>463</sup> vor. Für den Einflussfaktor „Wind“ können auf dieser Basis die verschiedenen Windzonen als Beschreibung der Cluster dienen:

Cluster	Wind	
	Intensität	Windzone
1	Schwach	Windzone 1
2	Mittel	Windzone 2 und 3
3	Hoch	Windzone 4

Abbildung 5-41: Cluster für den Einflussfaktor Wind

<sup>463</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN EN 1991-1-4/NA. Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen Windlasten. Berlin 2010, S.14.



### Hitze

Der Einflussfaktor „Hitze“ für das Bauteil Fahrbahn kann über die Anzahl an heißen Tagen pro Jahr berücksichtigt werden. Der Klimastatusbericht gibt jährlich eine Statistik mit klimatologischen Kenntagen heraus. Mit Hilfe dieser Statistik lässt sich erkennen, dass jedes Bundesland im Jahr 2020 an mindestens 7,4 Tagen mindestens eine Temperatur von 30°C hatte. Ein Temperaturminimum von 25°C gab es in jedem Bundesland an mindestens 26,4 Tagen. Aus diesen Zahlen lässt sich ableiten, dass eine Lebensdauerbeeinflussung von Fahrbahnen aus Asphalt in ganz Deutschland zu berücksichtigen ist. Als Parameter für die Quantifizierung des Einflusses dient die Anzahl an Sommertagen mit einer Temperatur > 25°C.<sup>464</sup>

### Feuchtigkeit

Der Feuchtigkeitsgehalt von Bauteilen beeinflusst maßgeblich den Fortschritt der Karbonatisierung und des Chlorideintrags (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Dieser kann sich je nach Lage der Bauteile unterscheiden. Der Feuchtigkeitsgehalt von Bauteilen kann daher aufgrund ihrer Lage am Bauwerk abgeschätzt werden. Die Einteilung der Bauteile in Feuchtigkeitsklassen wird basierend auf den Expositionsklassen der DIN 1045-2 vorgenommen. Diese unterscheiden die Bauteile nach ihrer Lage und damit der Feuchtigkeit, der sie ausgesetzt sind. Dementsprechend werden folgende Cluster gebildet:

Cluster	Feuchtigkeit
1	Trocken oder ständig nass
2	Nass, selten trocken
3	Mäßige Feuchte
4	Wechselnd nass und trocken

Abbildung 5-42: Cluster für den Einflussfaktor Feuchtigkeit

### Tausalz

Der Einsatz von Tausalz gilt als wesentlicher Einflussfaktor auf die Lebensdauer von Bauteilen (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Maßgebend für den Verbrauch von Streusalz sind Schneefalltage sowie Schneedeckentage. Die Anzahl an Frosttagen zeigt ebenfalls eine starke Korrelation zum Streusalzverbrauch. Allerdings sind für das Entstehen von Glätte nicht nur niedrige Temperaturen, sondern auch Fahrbahnnässe bzw. eine hohe Luftfeuchtigkeit Voraussetzungen. Der Parameter „Frosttage“ repräsentiert nur eine dieser beiden Voraussetzungen. Im Gegensatz dazu sind bei dem Parameter Schneedeckentage beide Voraussetzungen erfüllt, weshalb dieser Parameter im Folgenden näher betrachtet wird.<sup>465</sup>

Die Anzahl an Schneedeckentagen lässt sich über den Klimastatusbericht für jedes Bundesland quantifizieren und ist in Abbildung 5-43 für das Jahr 2020 dargestellt.<sup>466</sup>

<sup>464</sup> Vgl. Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht Deutschland- Jahr 2020. Offenbach 2021, S. 17.

<sup>465</sup> Vgl. Breitenstein, Jürgen: Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.). Verkehrstechnik Heft V 18. S. 24 –25.

<sup>466</sup> Vgl. Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. Offenbach am Main 2021, S. 17.

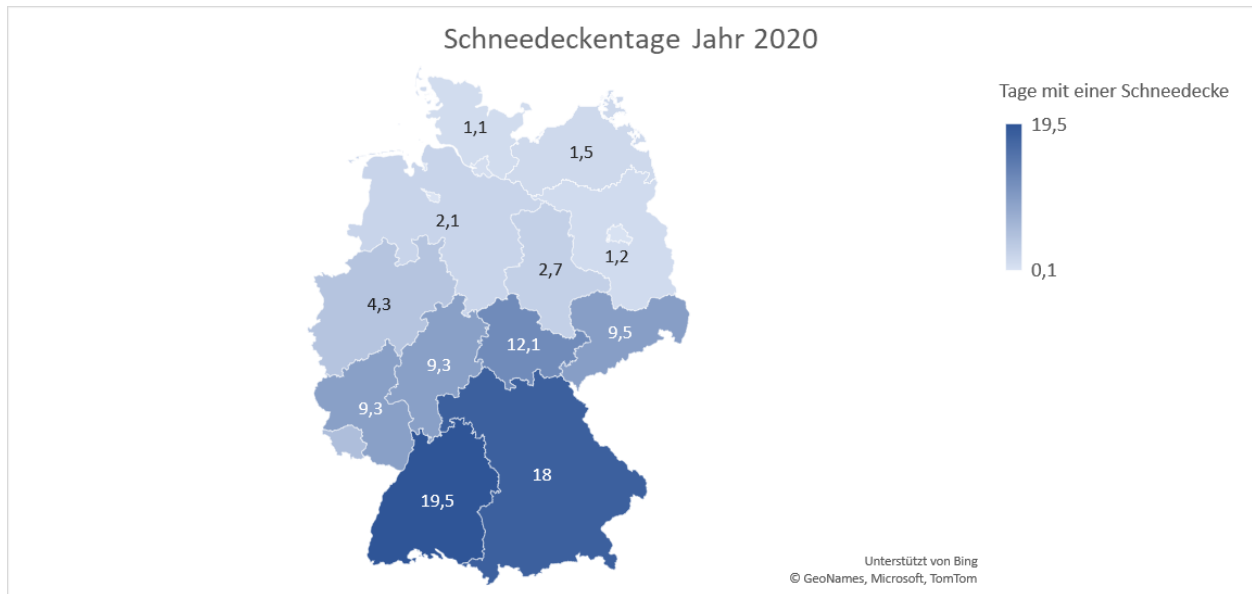


Abbildung 5-43: Schneedeckentage in Deutschland nach Bundesländern<sup>467</sup>

Vergleicht man die Darstellung der Anzahl der Schneedeckentage mit den Schneelastzonen des Nationalen Anhangs der DIN EN 1991 1-3 (vgl. Abbildung 5-44), lässt sich erkennen, dass den meisten Bundesländern mehr als nur eine Schneelastzone zugeordnet ist. Das Bundesland Bayern bspw. befindet sich je nach Region in den Schneelastzonen 1, 1a, 2 und 3. Die im bundesweiten Vergleich hohe Anzahl an Schneedeckentagen in diesem Bundesland lässt sich daher vermutlich auf die Regionen, die Zone 3 zugeordnet sind, zurückführen. Gleiches gilt für die Bundesländer Thüringen und Baden-Württemberg. Die Bundesländer Hamburg, Berlin, Bremen und Schleswig-Holstein liegen in Zone 2 und haben vergleichsweise wenig Schneedeckentage.

Aus diesem Vergleich wird deutlich, dass eine Einteilung der Schneedeckentage nach Bundesland nicht detailliert genug ist, um den Streusalzbedarf und damit den Einfluss auf den Abnutzungsverlauf zu ermitteln. Der Parameter Schneedeckentage muss daher auf Kreisebene erfasst werden, kann aber dann für die Datensammlung im Rahmen der Lebensdauerermittlung für die Erstellung von Clustern für die Abnutzung infolge von Tausalz herangezogen werden.

<sup>467</sup> Vgl. Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. Offenbach am Main 2021, S. 17.

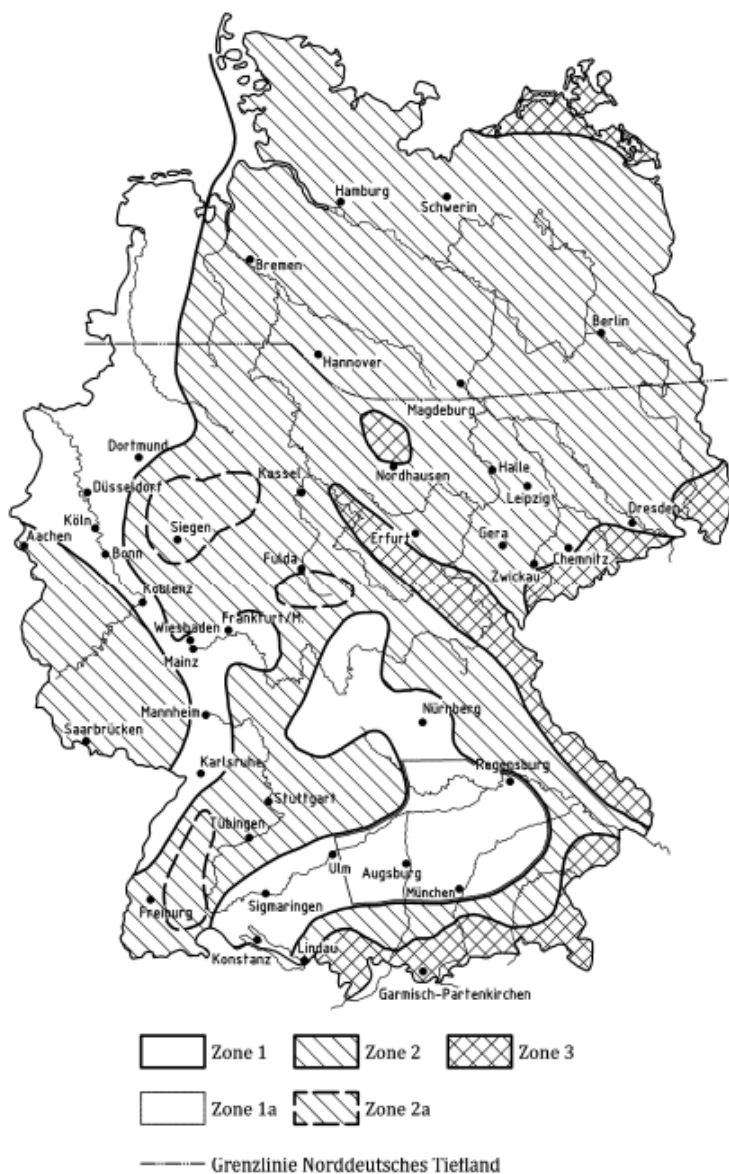


Abbildung 5-44: Schneelastzonen nach DIN EN 1991-1-3/ NA:2019-04<sup>468</sup>

### Frost

Wasser im Beton gefriert, sobald Temperaturen unterhalb des Gefrierpunktes auf den Beton einwirken. Daher gilt, je niedriger die Temperaturen, desto größer ist die Gefahr von Frostschäden. Als Parameter für Frostschäden kann die Anzahl an Eistagen (Temperaturmaximum < 0°C) herangezogen werden. Der Klimastatusbericht gibt einen Überblick über die Anzahl an Eistagen nach Bundesländern (vgl. Abbildung 5-45):

<sup>468</sup> Deutsches Institut für Normung: DIN EN 1991-1-3: Nationaler Anhang- National festgelegte Parameter. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten. Berlin 2019, S. 6.

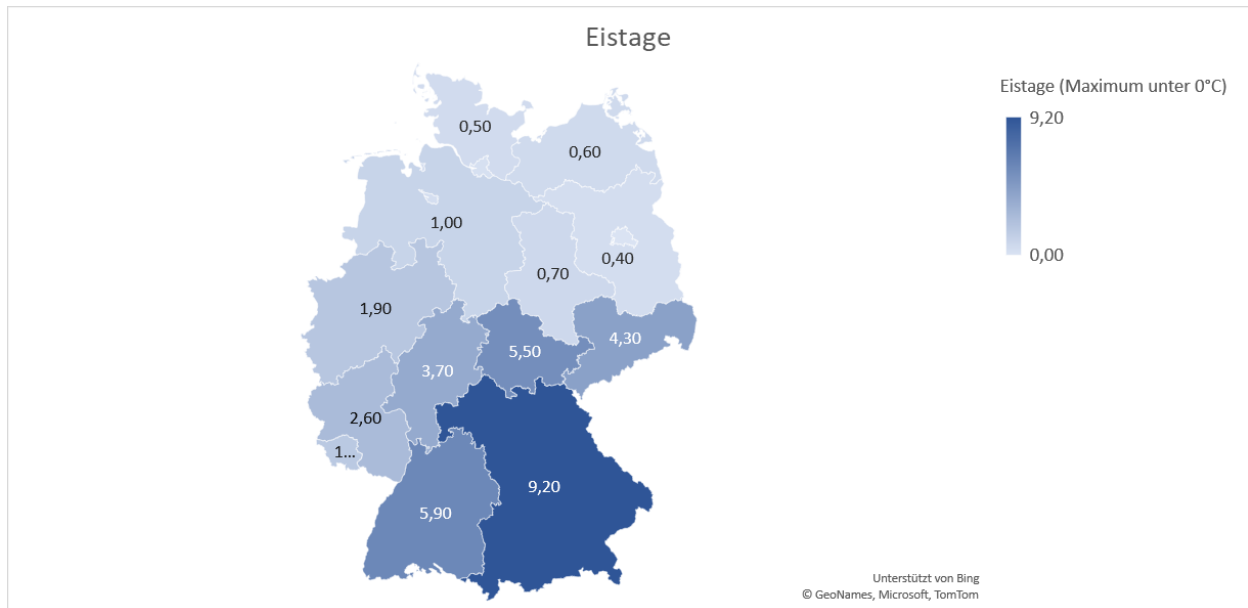


Abbildung 5-45: Anzahl an Eistagen in Deutschland nach Bundesländern<sup>469</sup>

Aus Abbildung 5-45 ist ersichtlich, dass die nördlichen Bundesländer Schleswig-Holstein sowie Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg die geringste Anzahl an Eistagen aufweisen. Für Bauwerke, die sich in diesen Regionen befinden, spielen daher Beschädigungen durch Frost nur eine untergeordnete Rolle. Für die Anzahl an Eistagen gilt, wie für die Anzahl an Schneedeckentagen, dass diese auf kommunaler Ebene ermittelt werden müssen, um größere klimatische Unterschiede innerhalb der Bundesländer zu berücksichtigen.

### 5.3.3 Nutzungsintensität

Für den Faktor der Nutzungsintensität kann auf Basis der aktuellen DTV-Werte eine Einstufung vorgenommen werden. Im Hinblick auf den Verschleiß und die Abnutzung der Bauteile sind die DTV sowie die anteilige DTV-SV wesentliche Größen. Aufgrund des vierten Potenz-Gesetzes<sup>470</sup>, welches besagt, dass der Verschleiß der Straße durch ein Fahrzeug mit der vierten Potenz seines Gewichtes jeweils bezogen auf die Achslast steigt, sind jeweils Cluster für den Schwerverkehr sowie für den Personenverkehr zu entwickeln. Die gesammelten Daten zu Lebensdauern von Bauteilen, auf die die Verkehrsstärke einen Einfluss hat, sind in diese Cluster einzuordnen und auf dieser Grundlage die Lebensdauern zu ermitteln. Basierend auf Untersuchungen zur Nutzungsintensität von Infrastrukturbauwerken von SPINNER<sup>471</sup> im Rahmen dieser Arbeit können für die Verkehrsbelastung folgende Cluster gebildet werden:

<sup>469</sup> Vgl. Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht Deutschland Jahr 2020. Offenbach am Main 2021, S. 17.

<sup>470</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. Schlussbericht 2. Auflage Bergisch Gladbach 2006, S. 15 ff.

<sup>471</sup> Vgl. Spinner, Sebastian: Untersuchung des Einflusses der Nutzungsintensität auf die Lebensdauer von Bauteilen von Infrastrukturbauwerke der KGR 300 und 400. Master's Thesis. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018.

Cluster	Verkehrsbelastung	
	Intensität	DTV [Kfz/24h]
1	niedrig	< 10.000
2	mittel	10.000 – 50.000
3	hoch	> 50.000

Abbildung 5-46: Clustereinteilung der täglichen Verkehrsbelastung DTV

Cluster	Verkehrsbelastung	
	Intensität	DTV <sub>SV</sub> [Kfz/24h]
1	niedrig	< 1.000
2	mittel	1.000 – 5.000
3	hoch	> 5.000

Abbildung 5-47: Clustereinteilung der täglichen Verkehrsbelastung DTV<sub>SV</sub>

Werden diese Cluster DTV zur Einteilung der Verkehrsstärke auf die Straßenklassen bezogen, wird ersichtlich, dass auf Bundesautobahnen ausschließlich hohe oder mittlere Intensitäten der Verkehrsbelastung vorkommen. Bei Bundesstraßen liegen die Nutzungsintensitäten nach dem täglichen Verkehr im mittleren und niedrigen Bereich, wobei beachtet werden muss, dass auf dieser Straßenklasse der Verkehr – im Gegensatz zu Autobahnen – meist nur auf zwei Fahrstreifen abgewickelt wird. Die Einteilung ist in Abbildung 5-48 dargestellt.

Straßenklasse	Cluster <sub>DTV</sub>		
	1	2	3
Autobahn	44,0 %	54,5 %	1,5 %
Bundesstraße	0,6 %	30,9 %	68,5 %
Landesstraßen	0,0 %	10,8 %	89,2 %
Kreisstraßen	0,0 %	5,9 %	94,1 %

Abbildung 5-48: Clusteranalyse der täglichen Verkehrsbelastung DTV nach Straßenklassen<sup>472</sup>

Für die Verkehrsbelastung durch den Schwerverkehr ergibt sich ein ähnliches Bild. Der größte Teil des Schwerverkehrs wird auf den Autobahnen abgewickelt. Fast zwei Drittel der Autobahnen weisen eine hohe tägliche Verkehrsbelastung durch den Schwerverkehr auf. Bei Bundesstraßen liegt die Verkehrsbelastung durch Schwerverkehr überwiegend im niedrigen Bereich. Abbildung 5-49 zeigt die Einteilung der Straßenklassen in die verschiedenen Cluster.

<sup>472</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenverkehrszählung 2010 und 2015. Internetquelle, 2018.

Straßenklasse	Cluster <sub>DTV<sub>SV</sub></sub>		
	1	2	3
Autobahn	62,8 %	35,3 %	1,9 %
Bundesstraße	0,2 %	21,3 %	78,5 %
Landesstraßen	0,0 %	2,3 %	97,7 %
Kreisstraßen	0,0 %	0,3 %	99,7 %

Abbildung 5-49: Clusteranalyse der täglichen Verkehrsbelastung DTV<sub>SV</sub> nach Straßenklassen<sup>473</sup>

### 5.3.4 Zusammenfassung

In Abbildung 5-50 sind die vorgestellten Einflussfaktoren dargestellt, welche bei der Datensammlung der Lebensdauern berücksichtigt werden müssen sowie deren Parameter, mit Hilfe derer sich die Einflüsse quantifizieren lassen:

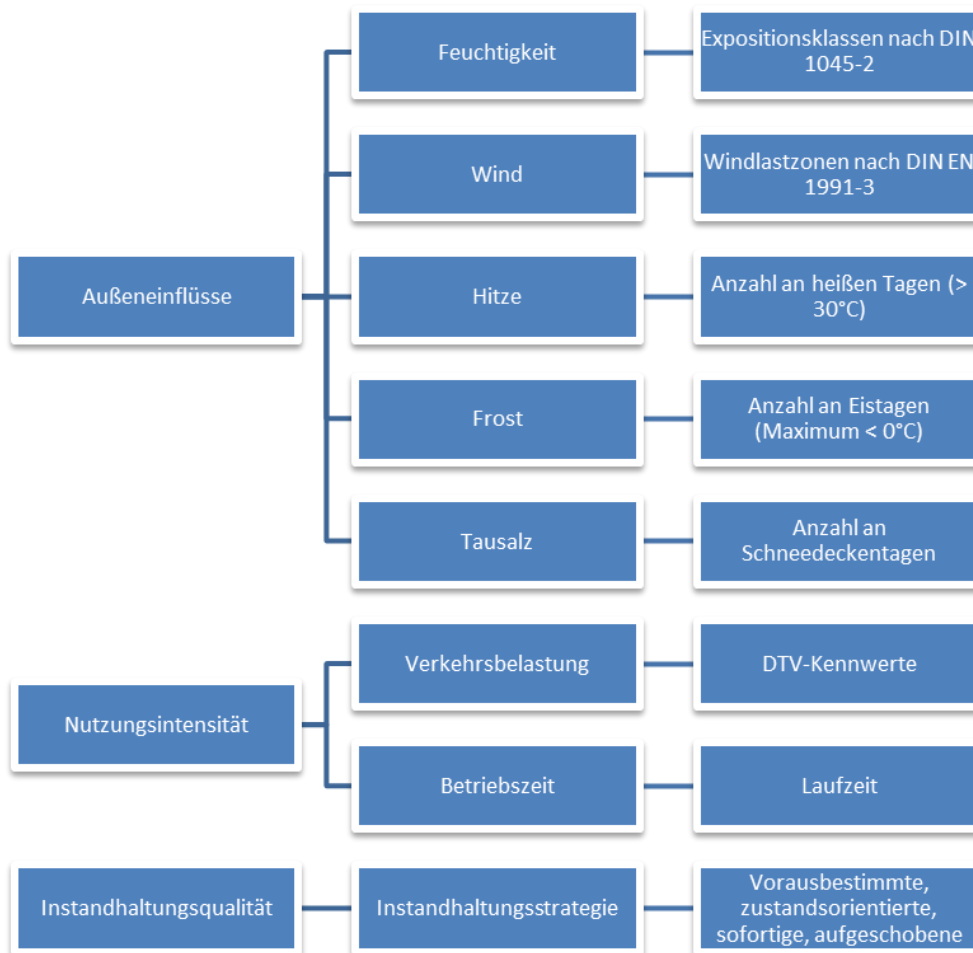


Abbildung 5-50: Einflussfaktoren und deren Parameter

<sup>473</sup> Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: Straßenverkehrszählung 2010 und 2015. Internetquelle.

Die vorgestellten Einflussfaktoren haben einen unterschiedlich starken Einfluss auf die einzelnen Bauteile eines Objekts. Dieser Einfluss kann im Rahmen dieser Arbeit nicht quantifiziert werden, da derartige Untersuchungen umfassende Versuchsreihen unter den gleichen Umgebungsbedingungen erfordern und derartige Daten aktuell nicht vorliegen. Daher wird die Grundlage für eine Untersuchung in Form einer Einflussmatrix geschaffen. Die Einflussmatrix enthält sämtliche Bauteile, welche sich je nach Bauwerk aus der Strukturierung der Objekte nach der Methodik in Kapitel 4.1 ergeben. Auf dieser Basis können die Bauteile und Einflussfaktoren in einer  $p \times k$  Matrix dargestellt werden.

Um einen ersten Anhaltspunkt zu liefern, wie stark sich ein Einflussfaktor auf die Lebensdauer eines Bauteils auswirkt, werden die standardisierten Einflussfaktoren nach primären und sekundären Einflüssen differenziert. Primärer Einfluss bedeutet, dass ein Bauteil direkt durch einen Einflussfaktor beschädigt wird und dieser Einflussfaktor damit direkte Auswirkungen auf die Lebensdauer des Bauteils hat. Die Nutzungsintensität in Form der Verkehrsstärke wirkt sich bspw. direkt auf die Lebensdauer des Fahrbahnübergangs aus und gilt damit für dieses Bauteil als primärer Einflussfaktor.

Werden Kräfte bzw. Spannungen, die an einem Bauteil A auftreten, an ein anderes Bauteil B weitergegeben, gilt dieser Faktor als sekundärer Einfluss für Bauteil B. Als Beispiel werden Windlasten genannt. Hohe Windlasten wirken sich primär auf den Brückenüberbau sowie die Pfeiler aus. Diese Bauteile geben die Kräfte an Lager, Gründungen und Widerlager weiter, die somit durch den Faktor „Wind“ sekundär beeinflusst werden (vgl. Kapitel 3.3.2.2). Beim Tunnelbau können durch Temperaturänderungen Spannungen in der Innenschale auftreten. Durch diese Verschiebungen kann die Abdichtungsschicht beschädigt werden. Der Faktor „Temperaturveränderung“ ist somit ein primärer Einflussfaktor für die Innenschale und ein sekundärer für die Abdichtung eines Tunnels.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Lebensdauer von Verkehrsinfrastrukturbauwerken von PRUMMER<sup>474</sup> bieten eine Grundlage für die Strukturierung der Einflussfaktoren und der Datenerfassung im Rahmen der Lebensdauererfassung für Infrastrukturbauwerke nach der hier vorgestellten Methodik. Auf dieser Basis können die Einflussfaktoren in primär und sekundär unterschieden und mittels einer Einflussmatrix dargestellt werden. Abbildung 5-51 bis Abbildung 5-53 zeigen die Einflussmatrix bestehend aus den Bauteilen und den Einflussfaktoren für Brücken, Tunnelbauwerke und Verkehrswege. Dabei bedeutet (0) kein Einfluss, (+) sekundärer Einfluss und (++) primärer Einfluss.

---

<sup>474</sup> Vgl. Prummer, Esther: Einflüsse auf die Lebensdauer von Bauteilen von Straßen, Brücken und Tunneln. Bachelor's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technischen Universität München. 2021.

Brücke	Außenräumliche Umgebungsbedingungen						Nutzungsintensität	
	Wind	Temperatur			Tausalz	Wasser	Verkehrsbelastung	
		Veränderung	Frost/ Kälte	Hitze		Regen/ Schnee	Verkehrslast	Geschwindigkeit
Lager	+	+	+	+	++	++	+	+
Ausstattung Kappen	++	0	0	0	0	++	0	0
Fahrbahn	0	++	++	++	++	++	++	++
Abdichtung	0	0	0	0	0	0	0	0
Fahrbahnübergang	0	0	++	0	++	++	++	++
Überbau	++	++	++	++	++	++	++	++
Widerlager	+	+	+	++	++	++	+	+
Pfeiler	++	+	+	++	++	++	+	+
Lärmschutzwand	++	0	++	0	++	++	0	0
Entwässerung	0	0	0	0	0	0	0	0
Kappen	0	++	++	0	++	++	0	0

Abbildung 5-51: Einflussmatrix Brücke

Tunnel	Außenräumliche Umgebungsbedingungen						Nutzungsintensität		
	Temperatur			Tausalz	Wasser	Erddruck	Verkehrsbelastung		
	Veränderung	Frost/ Kälte	Hitze		Regen/ Schnee		Verkehrslast	Geschwindigkeit	Betriebszeit
Innenschale	++	++	++	++	++	++	0	0	0
Auskleidung/ offene Bauweise	++	++	++	++	++	++	0	0	0
Fahrbahn	++	++	++	++	++	0	++	++	0
Abdichtung	+	+	+	0	0	+	0	0	0
Beleuchtung	0	0	0	++	0	0	++	++	++
Belüftung	0	0	0	++	0	0	++	0	++
Verkehrstechnische Anlagen	0	0	0	++	0	0	0	0	++
Sicherheitstechnische Einrichtungen	0	0	0	++	0	0	0	0	++
Energieversorgung	0	0	0	0	0	0	0	0	++
Steuerung	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entwässerung	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kappen	++	0	0	++	++	0	0	0	0

Abbildung 5-52: Einflussmatrix Lebensdauer Tunnel

Verkehrsweg	Außenräumliche Umgebungsbedingungen						Nutzungsintensität		
	Temperatur			Tausalz	Wasser	Verkehrsbelastung			
	Veränderung	Frost/ Kälte	Hitze		Regen/ Schnee	Verkehrslast	Geschwindigkeit	Betriebszeit	
Deckschicht	++	++	++	++	++	++	++	++	0
Tragschicht	+	+	+	0	0	+	+	+	0
Planum	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unterbau	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Untergrund	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fahrbahnmarkierungen	0	0	0	++	++	++	++	++	0

Abbildung 5-53: Einflussmatrix Lebensdauer Verkehrswege

Das Ergebnis dieses Vorgehens zur Datensammlung inkl. der Auswertung nach der in Kapitel 4.3 vorgestellten Methodik sind Abnutzungsverläufe für jedes Bauteil und Cluster. Das bedeutet, dass bspw. das Bauteil Fahrbahnübergang jeweils einen Abnutzungsverlauf für eine niedrige, mittlere und hohe Verkehrsbelastung besitzt. Die Lebensdauer ergibt sich dann aus einem der Abnutzungsverläufe unter Berücksichtigung der Strategie (vgl. Abbildung 4-5) und kann für die einzelnen Bauteile in den jeweiligen Standardräumen hinterlegt werden. Die Zuordnung der Lebensdauern erfolgt unter Berücksichtigung der Instandsetzungsgruppen, welche in Kapitel 5.1.2.2 und Kapitel 5.1.3.2 hergeleitet wurden. Für Bauteile, welche über den Betrachtungszeitraum nicht ausgetauscht werden, wird die maximale Lebensdauer



(Betrachtungszeitraum z.B. Gesamtnutzungsdauer) angesetzt. Hierzu zählen sämtliche Rohbauelemente. Folgenden Bauteilen wird damit eine unendliche Lebensdauer zugeordnet:

- Brücke: - Gründung
- Unterbau
- Überbau
- Böschungstreppe
  
- Tunnel: - Baugrubenverbau
- Rahmentragwerk
- Sicherung
- Innenschale

Für die Instandsetzungsplanung ist es unabdingbar, vorab konkrete Ziele und die entsprechenden Strategien, um diese Ziele zu erreichen, zu definieren. Die gewählte Strategie bestimmt den Zeitpunkt und die Häufigkeit einer Maßnahme. Das Durchführen von Maßnahmen orientiert sich an fest vorgegeben Intervallen und Parametern. Für eine aussagekräftige Kostenplanung müssen diese Intervalle definiert werden. Sie ermöglichen es, die Maßnahmen in ihrer Abhängigkeit zu planen. Der im Rahmen dieses Modells verwendete Parameter ist die Überlebenswahrscheinlichkeit. Dieser wird in Abhängigkeit von der Instandhaltungsstrategie festgelegt (vgl. Kapitel 4.3).

## 6 Ergebnisse

Das in Kapitel 5 entwickelte Modell stellt einen Leitfaden zur Berechnung der Investitionskosten von Verkehrsinfrastrukturbauwerken und somit zur Budgetplanung für den Erhalt einer funktionsfähigen Verkehrsinfrastruktur dar. Die dem Modell zugrundeliegende Methodik wurde in Kapitel 4 hergeleitet, um die Lebensdauern von Bauteilen sowie die Kostenkennwerte auf Positionsebene zu bestimmen und die Methodik für die Genese der Standardraumstrukturen zu entwickeln. Mit Hilfe des Modells werden die Investitionskosten unter Berücksichtigung der Objektkonzeption in frühen Projektphasen über die Gesamtnutzungsdauer bestimmt. Durch die durchgeführte Standardisierung der Bauwerke und die Verwendung von Kostenkennwerten auf Positionsebene werden die individuellen Objekteigenschaften der Bauwerke berücksichtigt und die Kosten in Abhängigkeit dieser angegeben. Dadurch ist die Berechnung der Kosten unter Berücksichtigung individueller Instandhaltungsstrategien für jedes einzelne Bauteil möglich. Ausgangspunkt der Untersuchung ist immer ein zu untersuchendes Objekt, dessen zukünftige Investitionskosten und Herstellungskosten bestimmt werden sollen. Das Modell lässt sich für Bauwerke in der Planung und im Bestand anwenden.

### 6.1 Objektstruktur und Instandsetzungsgruppen

In Kapitel 4.1 wurde eine Methodik hergeleitet, um ein Objekt  $O$  in seine einzelnen Bestandteile zu gliedern. Diese Objektstruktur enthält sämtliche Bauteile  $BT_i$ , welche für die Berechnung der Herstellungskosten sowie der zukünftigen Investitionskosten berücksichtigt werden müssen. Da während des Lebenszyklus eines Bauwerks die einzelnen Komponenten regelmäßig erneuert werden, hat das Bauwerk theoretisch eine unendliche Nutzungsdauer. Möglicherweise kann der Funktionsbetrieb des Objekts allerdings eingeschränkt sein und die Wirtschaftlichkeit des Objekts ist nicht mehr gewährleistet. Dem Modell liegt die Annahme zugrunde, dass die Baukonstruktion während der Gesamtnutzungsdauer des gesamten Objekts nicht ausgetauscht werden muss. Nach Erreichen der Gesamtnutzungsdauer erfolgt der Abbruch und Neubau des Objekts.

Für eine bauteilorientierte Instandsetzung werden Abhängigkeiten und Verknüpfungen von Bauteilen zu angrenzenden Bauteilen berücksichtigt. Hierfür wurden Kriterien hergeleitet, durch welche die physischen und funktionalen Abhängigkeiten von Bauteilen beschrieben werden. Durch die Herleitung der verschiedenen Kriterien wurde eine Grundlage für die Bildung von Instandsetzungsgruppen  $IG_j$  für eine bauteilbezogene Instandsetzung geschaffen. Eine Instandsetzungsgruppe  $IG_j$  besteht aus einer endlichen Anzahl an Bauteilen, von denen eines als maßgebendes Bauteil bezeichnet wird. Die Instandsetzung dieses maßgebenden Bauteils bringt die Instandsetzung der gesamten Instandsetzungsgruppe mit sich. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten die Grundlage für die Modellentwicklung.

Die Anwendung der Methodik ist Gegenstand von Kapitel 5.1. Das zu untersuchende Bauwerk wurde in funktional abgegrenzte, standardisierte Funktionseinheiten  $FE_k$  unterteilt. Für die Bildung dieser Einheiten wurden vorhandene Gliederungen aus Normen und Richtlinien sowie der Literatur untersucht und für diese Arbeit um weitere Funktionseinheiten ergänzt sowie auf Bauteilebene weiterentwickelt. Die Funktionseinheiten  $FE_k$  wurden in Bauteile  $BT_i$ , gegliedert.

Aus diesen Bauteilen wurden die Instandsetzungsrelevanten Bauteile für eine aussagekräftige Kostenermittlung identifiziert. Aufgrund der technischen Ausstattung heutiger Tunnelbauwerke ergeben sich weitaus mehr Bauteile, die zu berücksichtigen sind, als bei Brückenbauwerken oder Verkehrswegen.

Die identifizierten Bauteile wurden im nächsten Schritt nach der in Kapitel 4.1 entwickelten Methodik auf ihre physischen und funktionalen Abhängigkeiten hin analysiert. Insbesondere sind Kriterien der konstruktiven Verbindungen (Flächenverbindung/Einzelverbindung, lösbar/ nicht lösbar) sowie die Zugänglichkeit von Bauteilen (sichtbar/verdeckt) zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Analyse in Kapitel 5.1 bilden die Instandsetzungsgruppen. Zu beachten ist, dass die Instandsetzungsgruppen unabhängig von dem jeweiligen betrachteten Objekt aus denselben Bauteilen bestehen. Die Lebensdauern unterscheiden sich für jedes Objekt, da die Lebensdauern von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden, welche für jedes Objekt unterschiedlich sind. Abbildung 6-1 zeigt die Kriterien, welche für die Bildung der Instandsetzungsgruppen untersucht werden (vgl. Kapitel 4.2).

Funktionseinheit A	Flächenverbindung (F) vs. Einzelverbindung (E)		Sichtbar (S) vs. verdeckt (V)		Lösbare (L) vs. Nicht lösbare Verbindung (NL)	
	(F)	(E)	(S)	(V)	(L)	(NL)
Bauteil 1						
Bauteil 2						
Bauteil 3						
Bauteil 4						

Abbildung 6-1: Kriterien zur Bildung von Instandsetzungsgruppen

Beispielsweise wurden für Brückenbauwerke bei der Deckschicht die meisten Abhängigkeiten zu anderen Bauteilen festgestellt. Bei Straßenverkehrswegen müssen bei Instandsetzung einer unteren Schicht sämtliche darüber liegende Schichten ebenfalls erneuert werden. Die Technischen Anlagen in Tunnelbauwerken lassen sich weitestgehend unabhängig von anderen Bauteilen instand setzen. Abbildung 6-2 zeigt die gebildeten Instandsetzungsgruppen aus Kapitel 5.1.

Maßgebendes Bauteil	Instandsetzungsgruppe	Bauteile
<b>Brücke</b>		
Kappe	IS 1	Kappe
		Schutzeinrichtungen
		Lärmschutzkonstruktionen
Schutzschicht	IS 2	Schutzschicht
		Deckschicht
Abdichtung	IS 3	Abdichtung
		Fahrbahn-Deckschicht
		Fahrbahn- Schutzschicht
Entwässerung Fahrbahn	IS 4	Deckschicht
<b>Tunnel</b>		
Entwässerung Fahrbahn	IS 1	Deckschicht
Entwässerung Bauwerk	IS 2	Innenschale
		Abdichtung
Verkehrsdatenerfassung	IS 6	Deckschicht
Verkabelung	IS 18	Kappen
Abdichtung	IS 20	Abdichtung
		Innenschale
<b>Straßenverkehrsweg</b>		
Deckschicht	IS 1	Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
Tragschicht	IS 2	Tragschicht
		Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
Entwässerungsrohre	IS 3	Entwässerungsrohre
		Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen
Planum	IS 5	Planum
		Tragschicht
		Deckschicht
Unterbau	IS 6	Fahrbahnmarkierungen
		Unterbau
		Planum
		Tragschicht
		Deckschicht
		Fahrbahnmarkierungen

Abbildung 6-2: Instandsetzungsgruppen

Die Modelloperationen zur Strukturierung des Objekts und zur Bildung der Instandsetzungsgruppen sind in Abbildung 6-3 dargestellt.

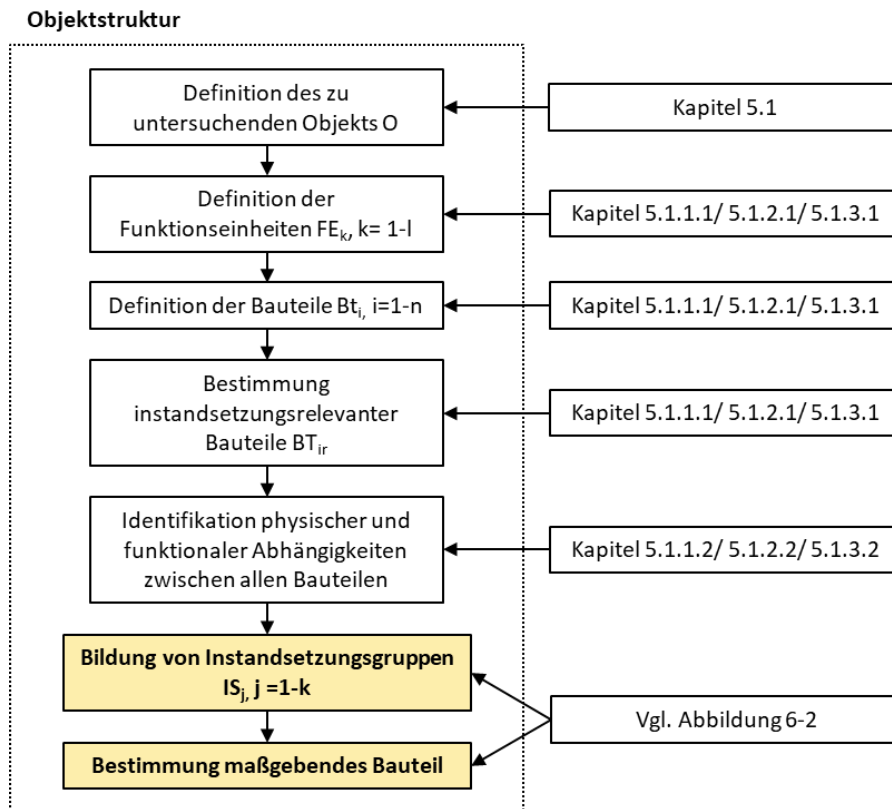


Abbildung 6-3: Modelloperationen zur Herleitung einer Objektstruktur

## 6.2 Lebensdauer

Für sämtliche Bauteile der entwickelten Objektstruktur werden technische Lebensdauern für die Instandsetzungsplanung ermittelt. Die technischen Lebensdauern werden über den Abnutzungsverlauf beschrieben. In Kapitel 4.3 wurde eine Methodik entwickelt, um den Abnutzungsverlauf über die Zeit zu bestimmen und verschiedene Instandhaltungsstrategien bei der Instandsetzungsplanung zu berücksichtigen. Die Methodik beruht auf der Anwendung der Extremwerttheorie und der Annahme, dass ein Bauteil aus mehreren Komponenten besteht, welche unabhängig voneinander sind und derselben Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen. Mit Hilfe der Weibullverteilung lässt sich der Verlauf der Überlebenswahrscheinlichkeit über die Zeit bestimmen und somit als Ergebnis eines stochastischen Prozesses mathematisch beschreiben. Dieser Verlauf wird in Abhängigkeit der verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt.

Voraussetzung für eine Ermittlung der Lebensdauern ist eine strukturierte Datensammlung. Es wurde eine einheitliche Struktur zur Erfassung und Gliederung der Lebensdauern entwickelt. So können die Daten nach einer immer gleichen Systematik dokumentiert werden. Für Bauteile der Baukonstruktion wird im Rahmen der Modellentwicklung eine unendliche Lebensdauer angesetzt. Ein Abbruch dieser Bauteile ist gleichbedeutend mit einem kompletten Abbruch und Ersatzneubau.

Es müssen sowohl das Alter des Bauteils als auch dessen Zustand zum Zeitpunkt des Austauschs gesammelt werden, da Bauteile oft vor dem Ende ihrer technischen Lebensdauer ausgetauscht werden. Geht man bei allen Bauteilen davon aus, dass der Austauschzeitpunkt der

technischen Lebensdauer entspricht, führt diese Annahme zu einer Verfälschung der Daten. Ergebnis der Datenauswertung wäre dann die mittlere Verweildauer des Bauteils im Objekt und nicht die tatsächliche technische Lebensdauer. Der Zustand lässt sich bspw. für Ingenieurbauwerke über die Schadensbewertungen nach der RI-EBW-Prüf bestimmen und durch Annahme einer linearen Skala in Zustandsbereiche einteilen.

In Kapitel 5.3 wurde die Grundlage für eine Datenbank zur Bestimmung der Lebensdauern entwickelt. Diese Datenbank muss in Deutschland einheitlich geführt werden. Die Daten sind von jeder Organisationseinheit einzutragen. Auf Basis der Einflussfaktoren, welche durch die DIN ISO 15686 genannt werden, wurden die für die Infrastruktur relevanten Bereiche identifiziert. Es zeigte sich, dass die Nutzungsintensität, die Instandhaltungsqualität sowie die äußeren Umgebungsbedingungen die wesentlichen Faktoren darstellen. Für eine aussagekräftige Lebensdauerberechnung wurden diese Faktoren weiter unterteilt und so eine Einflussmatrix für die Datensammlung erstellt, welche sämtliche Bauteile und relevanten Einflüsse individuell erfasst. Die Einflussfaktoren sind in einem nächsten Schritt in Cluster einzuteilen.

Für jeden Einflussfaktor sind Parameter hergeleitet worden, anhand derer die Stärke des Einflusses gemessen wird und die Einteilung der Cluster erfolgt. Diese werden bspw. für den Faktor Nutzungsintensität anhand der DTV- Werte in eine niedrige, mittlere und hohe Belastung eingeteilt. Abbildung 6-4 gibt einen Überblick über die Einflussfaktoren sowie deren Parameter für die Erstellung der Cluster.

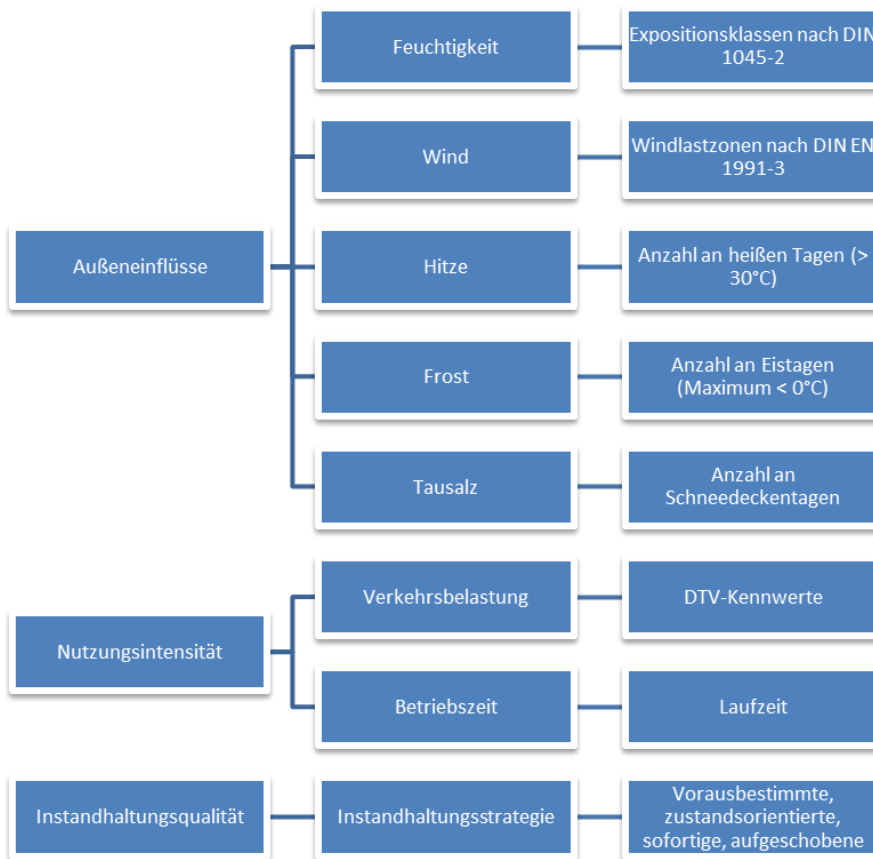


Abbildung 6-4: Einflussfaktoren und dazugehörige Parameter

Um die Auswirkungen eines Einflusses auf die Bauteile zu untersuchen, wurde eine Einflussmatrix erstellt, die in primäre und sekundäre Einflussfaktoren unterscheidet. Primärer Einfluss bedeutet, dass ein Faktor direkte Auswirkungen auf den Verlauf des Abnutzungsvorrates eines Bauteils hat. Überträgt ein Bauteil die Kräfte oder Beschädigungen, die durch einen primären Einfluss entstehen, auf ein angrenzendes Bauteil, gilt für dieses Bauteil der Einfluss als sekundär. Diese Unterteilung bietet eine Basis für weitergehende Untersuchungen hinsichtlich der quantitativen Auswirkungen der Einflussfaktoren.

Einen wesentlichen Faktor, der die Lebensdauer beeinflusst, stellt die Instandhaltungsstrategie dar. Durch die gewählte Instandhaltungsstrategie werden Häufigkeit und Zeitpunkt der Maßnahmen bestimmt. Sie ist daher ein wesentlicher Einflussparameter für den Instandsetzungszeitpunkt. Bei einer vorausbestimmten Instandhaltung ist der Nutzenverlust am größten, da der Abnutzungsvorrat nicht bis zum Ausfall genutzt wird. Diese Strategie gewährleistet aber auch die höchste dauerhafte Verfügbarkeit. Für eine aufgeschobene Instandhaltung gilt genau das Gegenteil. Den einzelnen Bauteilen können gemäß der Kritikalitätsberechnung aus Kapitel 3.1.3 die vorausbestimmte, zustandsorientierte, sofortige und aufgeschobene Instandhaltung zugeordnet werden. Für jedes Bauteil wird eine eigene Strategie festgelegt, so dass sich für das Objekt unterschiedliche Strategien ergeben. Daher ist es möglich, dass sich die Lebensdauer für zwei identische Bauteile mit denselben Einflussfaktoren unterscheidet. Für die verschiedenen Instandhaltungsstrategien müssen Grenzen  $g_i$  festgelegt werden, durch die die Strategien unterschieden werden können. Die Grenzen orientieren sich an dem noch vorhandenen Abnutzungsvorrat und stellen die noch vorhandene Überlebenswahrscheinlichkeit dar, ab der die Instandsetzung erfolgt. Ist der Abnutzungsverlauf eines Bauteils über die Zeit bekannt, können die Lebensdauern unter Berücksichtigung der Strategie bestimmt werden. Diese Lebensdauern werden mit  $\lambda$  bezeichnet:

$$LD(g_i) = \lambda$$

**Formel 6-1: Lebensdauer in Abhängigkeit der Instandsetzungsgrenze**

In Abbildung 6-5 ist der Zusammenhang zwischen der Lebensdauer und der Instandhaltungsstrategie dargestellt. Auf der Abszisse ist die Nutzungsdauer dargestellt. Die Ordinate kennzeichnet den Abnutzungsvorrat in Prozent.

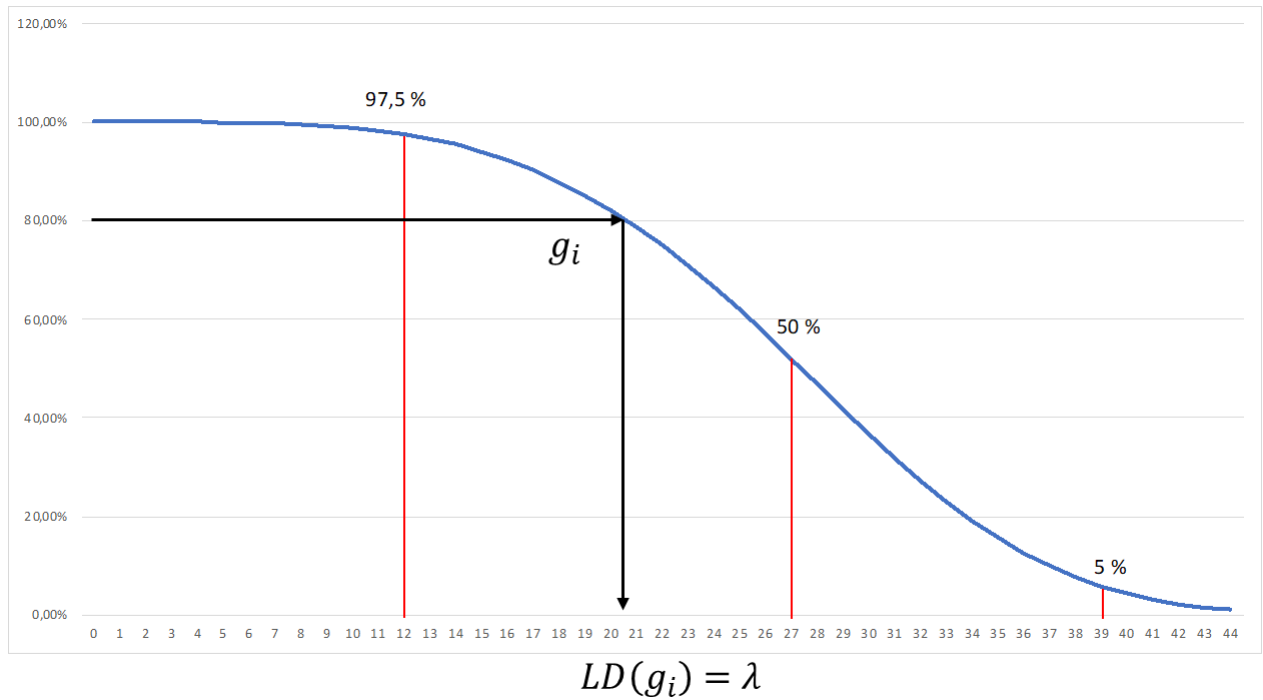


Abbildung 6-5: Zusammenhang zwischen der Lebensdauer und der Instandhaltungsstrategie

Abbildung 6-6 fasst die einzelnen Schritte der Datensammlung für die Lebensdauerberechnung zusammen.

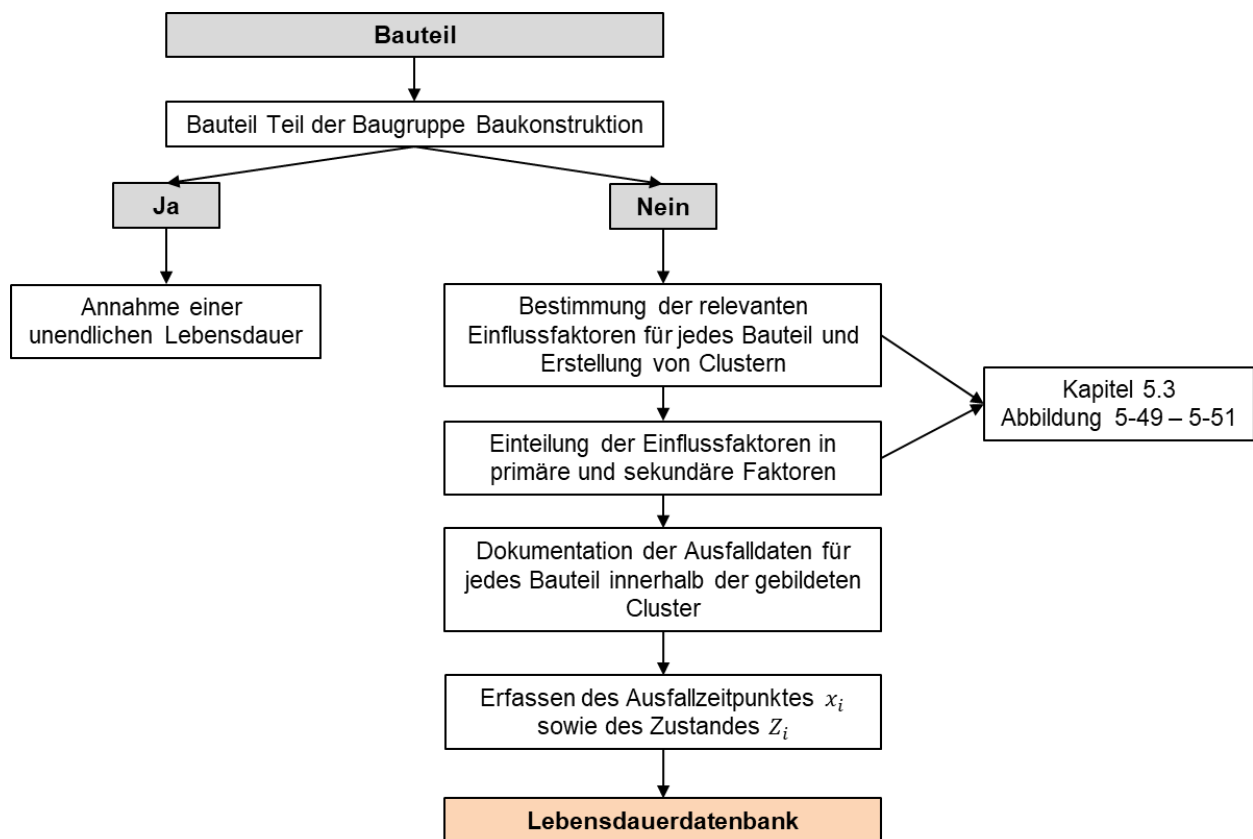
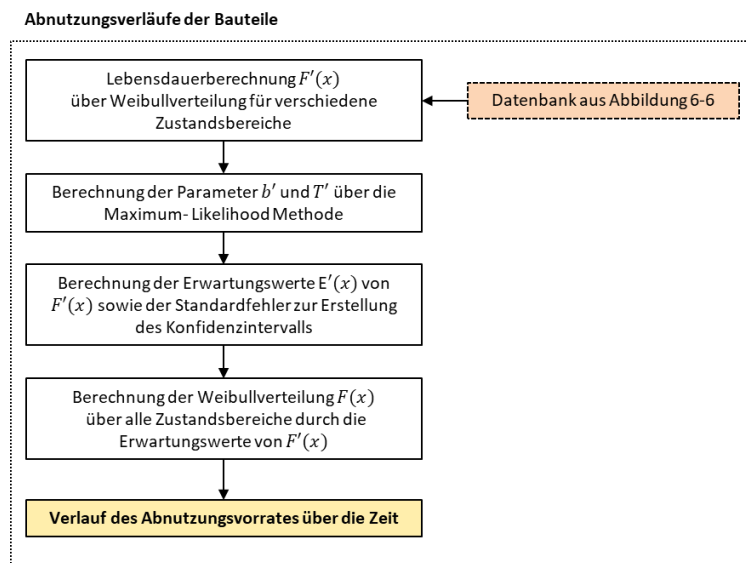


Abbildung 6-6: Vorgehen zur Erfassung der Austauschzeitpunkte



Wurde eine ausreichende Datenmenge entsprechend den beschriebenen Vorgaben gesammelt, wird mittels der Weibullverteilung der Abnutzungsverlauf über die Zeit bestimmt. Die Parameter der Verteilung werden über die Maximum-Likelihood Methode berechnet. Zunächst müssen die Abnutzungsverläufe für jeden Zustandsbereich bestimmt werden. Aus den verschiedenen Erwartungswerten lässt sich der Abnutzungsverlauf über die Zeit über alle Zustandsbereiche berechnen. Um die Unschärfe des Modells und der Eingangswerte zu berücksichtigen, wird ein Konfidenzintervall über den Standardfehler der Erwartungswerte angegeben. Als Ergebnis ergeben sich dann für jedes Bauteil verschiedene Abnutzungsverläufe über die Zeit in Abhängigkeit der Einflussfaktoren. Abbildung 6-7 zeigt das Vorgehen zur Bestimmung der Abnutzungsverläufe.



**Abbildung 6-7: Ablauf zur Bestimmung der Abnutzungsverläufe**

Anhand der vorhandenen Vernetzungen der Bauteile untereinander wurden verschiedene Instandsetzungsgruppen definiert, welche ein maßgebendes Bauteil enthalten (vgl. Kapitel 6.1). Dieses maßgebende Bauteil bringt die Instandsetzung der gesamten Gruppe mit sich. Dadurch kann es passieren, dass Abnutzuvorrat von anderen Bauteilen, deren Lebensdauer noch nicht erreicht ist, verschrenkt wird. Um die wirtschaftlich optimale Kombination von Maßnahmen einer Instandsetzungsgruppe zu untersuchen, wurde in Kapitel 4.3.3 eine Methodik hergeleitet, mit der es möglich ist, die Kosten für eine Instandsetzungsgruppe über einen festgelegten Zeitraum für verschiedene Varianten zu berechnen. Zunächst wird eine Rangfolge entsprechend den Lebensdauern  $\lambda$  der Bauteile  $BT_i$  einer Instandsetzungsgruppe  $IG_j$  erzeugt. Basierend auf den Lebensdauern werden mit Hilfe der Formeln aus Kapitel 4.3.3 verschiedene Varianten der Instandsetzungsreihenfolge monetär untersucht und bewertet. Die kostengünstigste Variante gibt die Instandsetzungszeitpunkte der Bauteile einer Instandsetzungsgruppe vor.

Abbildung 6-8 fasst den Ablauf zur Bestimmung der Instandsetzungszeitpunkte in Abhängigkeit der Strategie zusammen.

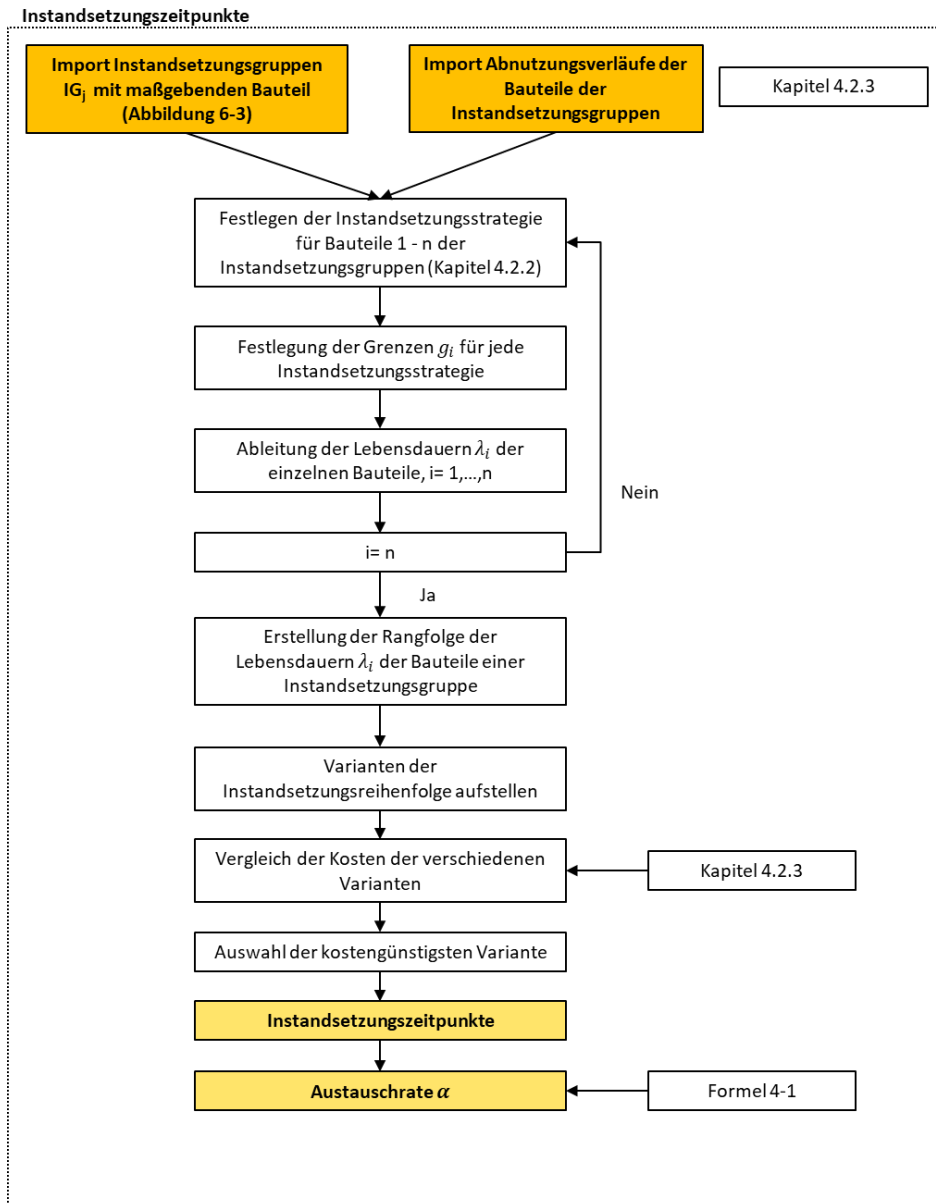


Abbildung 6-8: Bestimmung der Instandsetzungszeitpunkte

### 6.3 Standardraumstrukturen

Für die Kostenermittlung wurde die Methodik der Standardraumstrukturen für Verkehrsinfrastrukturobjekte weiterentwickelt. So kann das zu untersuchende Objekt realitätsnah abgebildet werden. Die Standardraumstrukturen stellen das Leistungssoll dar. Die Methodik für die Genese der Standardraumstrukturen sowie der Quantifizierung der Kostenkennwerte wurde in Kapitel 4.3 hergeleitet. Es wurden verschiedene Ebenen definiert. Die oberste Ebene legt den Bauwerkstyp fest. Die zweite Ebene unterteilt das Bauwerk in die Baugruppen Baukonstruktion, Technische Anlagen und Ausstattung. Die Standardräume stellen die dritte Ebene dar, denen auf der vierten Ebene die einzelnen Bauteile zugeordnet werden. Die fünfte Ebene bildet die Positionen ab. In den Standardraumstrukturen sind sämtliche Leistungen enthalten, die für die Herstellung und die Instandsetzung des Objekts notwendig sind. Abbildung 6-9 zeigt das allgemeine Rahmenmodell zur Genese der Standardraumstrukturen.

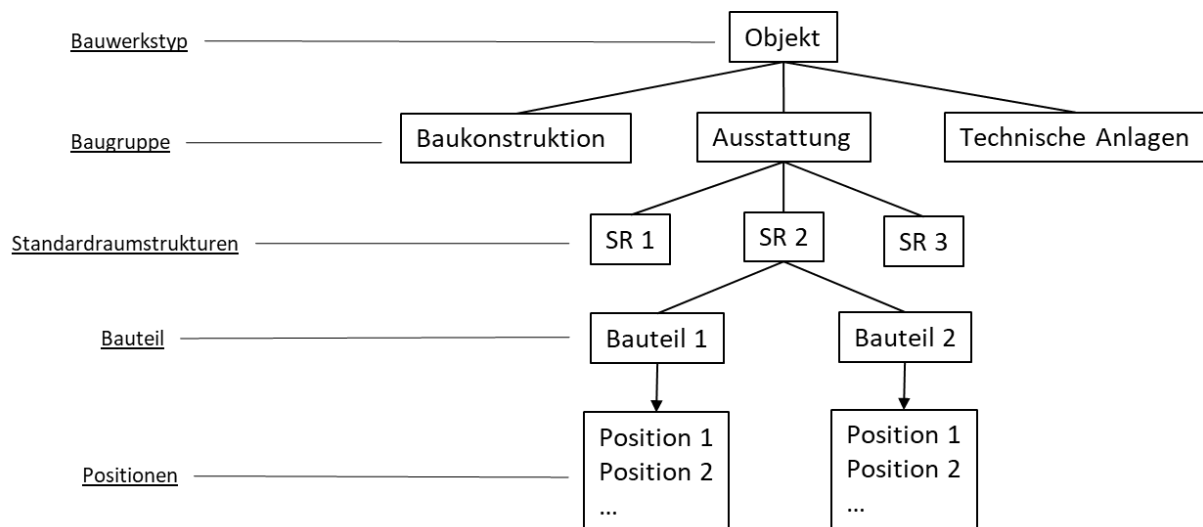


Abbildung 6-9: allgemeines Rahmenmodell für die Genese der Standardraumstrukturen

In Kapitel 4.3.5 erfolgte die Herleitung einer Methodik zur Bestimmung von Kostenkennwerten für die Standardraumstrukturen durch eine empirische Untersuchung. Für die Genese von Kostenkennwerten sind Daten in Form von angebotenen Leistungsverzeichnissen mit Preisspiegeln und beauftragten Leistungsverzeichnissen zu erheben. Es ist eine Kostendatenbank anzulegen, welche die hergeleiteten Positionen mit den dazugehörigen Kostenkennwerten aus den zur Verfügung stehenden Projekten und relevanten Informationen enthält. Die Kostenkennwerte der einzelnen Projekte werden mittels makroökonomischer Normalisierungsfaktoren (Regionalfaktor, Baupreisindex) vergleichbar gemacht. Die statistischen Kenngrößen werden auf Grundlage der normalisierten Kostenkennwerte berechnet. Neben den makroökonomischen Einflussfaktoren wurden auf Grundlage der Literaturrecherche aus Kapitel 3.4.5 weitere sogenannte Merkmalsfaktoren als Einflüsse auf die Kostenkennwerte hergeleitet. Die Kostendatenbank wird um diese Variablen ergänzt:

- Merkmalsfaktor  $MF_{Menge}$  Menge der ausgeführten Position: Merkmalsfaktor
- Merkmalsfaktor  $MF_{Größe}$  Größe des Bauwerks
- Merkmalsfaktor  $MF_{HZ\_OP}$  und  $MF_{HZ\_TP}$ : Die technischen Anforderungen eines Bauwerks
- Lagefaktors  $MF_{Lage}$ : Straßenkategorie
- Wiederholungsfaktor  $MF_{WF}$ . Die Anzahl der Bauwerke, die in einer Ausschreibung enthalten sind

In Kapitel 5.2 erfolgte die Genese der Standardräume mit Hilfe von Entwurfsgrundlagen aus der Literatur sowie den einschlägigen Normen und Regelwerken und den zur Verfügung stehenden Leistungsverzeichnissen. Das Bauwerk wird in Standardräume gegliedert, die sämtliche Bauteile enthalten, die notwendig sind, die Funktion zu erfüllen. Die Standardräume wurden mit ausführungsorientierten Positionsbeschreibungen belegt. Jeder Position wurden individuelle Formeln zur Mengenermittlung sowie Kostenkennwerte und Lebensdauer zugeordnet. Die Mengenermittlung innerhalb eines Standardraums bezieht sich auf verschiedene Objekteigenschaften. Durch die Kostenermittlung auf Positionsebene kann eine genaue Normierung und Skalierung des Objekts unter Berücksichtigung der individuellen Objektkonzeption vorgenommen und so eine vollumfängliche Kostensicherheit gewährleistet

werden. Die Lebensdauern der einzelnen Bauteile, welche sich nach Kapitel 6.2 berechnen, werden ebenfalls in den Standardräumen hinterlegt.

Das Verfahren zur Bestimmung der Investitionskosten zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung basiert auf der Festlegung und Auswahl der Standardräume auf Grundlage der Mengenermittlung mit Standardraumstrukturen. Für die Modellrechnung sind Informationen aus der Vorplanung (Leistungsphase 2 der HOAI) wie Bauwerksabmessungen erforderlich. Diese Abmessungen müssen zum Teil von anderen Disziplinen wie der Tragwerksplanung oder Geotechnik geliefert werden (z.B. Bewehrungsgrad, Art der Gründung). Dadurch werden die Standardräume ausgewählt und das Objekt mengenmäßig auf der Ebene von Positionen beschrieben. Dies ermöglicht eine belastbare Berechnung der Herstellungskosten und zukünftigen Investitionskosten der Kostengruppen 300 und 400 bereits in frühen Projektphasen.

Abbildung 6-10 bis Abbildung 6-12 zeigen eine Übersicht der erstellten Standardräume:

<b>Übersicht Standardräume Straße</b>	
<b>SRS-Nummer</b>	<b>Bezeichnung</b>
01	Erdarbeiten
02	Oberbau
03	Ausstattung
04	Entwässerung

**Abbildung 6-10: Entwickelte Standardräume Straße**

<b>Übersicht Standardräume Brücke</b>	
<b>SRS-Nummer</b>	<b>Bezeichnung</b>
01	Erdaushub
02	Gründung
03	Unterbau
04	Überbau
05	Lager
06	Kappen
07	Fahrbahn
08	Fahrbahnübergang
09	Böschungstreppe
10	Instandsetzung Überbau
11	Ausstattung Kappen
12	Traggerüste

**Abbildung 6-11: Entwickelte Standardräume Brücke**

Übersicht Standardräume Tunnel	
SRS-Nummer	Bezeichnung
01	Gründung
02	Baugrubenverbau
03	Offene Bauweise
04	Erdaushub
05	Geschlossene Bauweise
06	Beleuchtung
07	Belüftung
08	Verkehrstechnische Anlagen
09	Notrufstation
10	Videoüberwachung
11	Tunnelfunkanlage
12	Lautsprecheranlage
13	Brandmeldeanlage
14	Löscheinrichtungen
15	Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung
16	Energieversorgung
17	Verkabelung
18	Steuerung und ZLT
19	Fahrbahn
20	Kappen
21	Abdichtung
22	Entwässerung

**Abbildung 6-12: Entwickelte Standardräume Tunnel**

Im Bereich von Brückenbauwerken und der Baukonstruktion von Tunnelbauwerken einschließlich der Entwässerung existieren im Rahmen des Standardleistungskatalogs für den Straßen- und Brückenbau einheitliche Leistungsbereiche mit vorgefertigten Leistungstexten, die die Vergleichbarkeit verschiedener Projekte gewährleisten. Anhand dieser vorgefertigten Leistungstexte wurden die Standardräume mit ausführungsorientierten Positionen ausgestattet.

Für Leistungen der Kostengruppe 400 von Tunnelbauwerken (ausgenommen Entwässerung) existieren derartige einheitliche Leistungsbereiche mit vorgefertigten Texten für Leistungspositionen nicht, weshalb bei der Genese dieser Standardräume auf Leistungsbeschreibungen ausgeführter Projekte zurückgegriffen wurde.

Um eine Sortierung der Daten vorzunehmen und kostenrelevante Positionen zu identifizieren, wurde mit Hilfe der vorliegenden Datenbasis eine ABC-Analyse ausgeführt. Die Einteilung der Positionen wurde basierend auf dem Pareto – Prinzip vorgenommen:

- Positionen Klasse „A“ bilden 80 % der Gesamtkosten einer Baumaßnahme,
- Positionen Klasse „B“ bilden weitere 15 % der Gesamtkosten,
- Positionen Klasse „C“ bilden die letzten 5 % der Gesamtkosten.

Mit Hilfe der ABC-Analyse wurden auf Grundlage der vorhandenen Daten kostenrelevante Positionen identifiziert. Positionen, welche der Klasse „C“ angehören, sind nicht Bestandteil der Standardräume.

Bei der technischen Ausstattung von Tunnelbauwerken machen ca. 16 % der Positionen 80 % der Kosten aus, während 58 % der Positionen nur einen Anteil von 5 % an den Gesamtkosten haben. Abbildung 6-13 zeigt das Ergebnis der Untersuchung für Tunnelbauwerke.

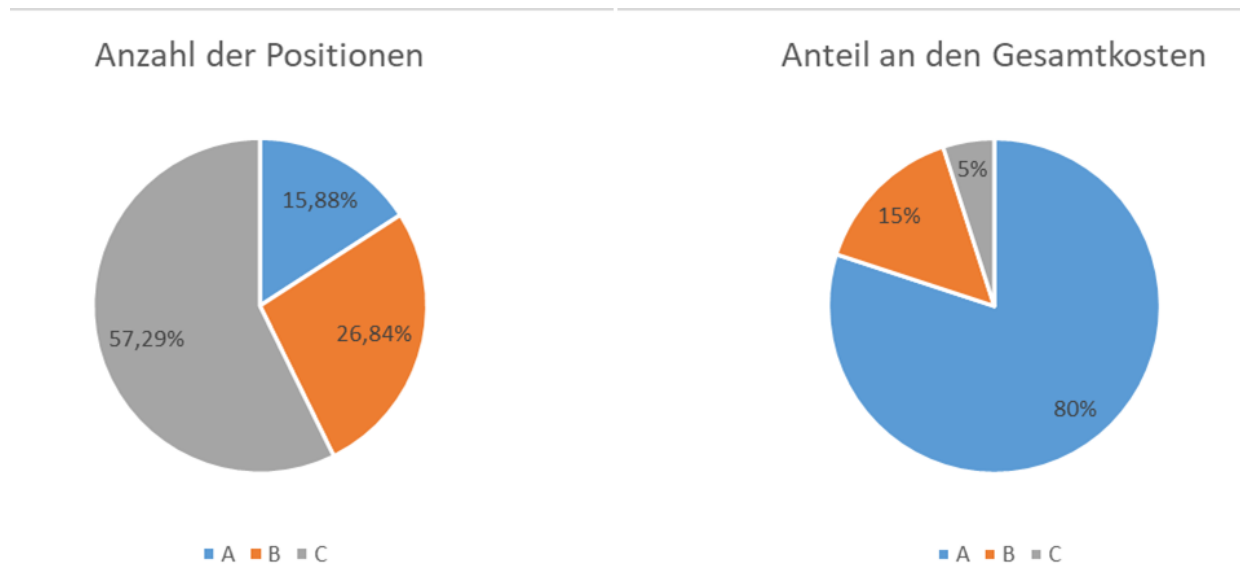


Abbildung 6-13: Ergebnis der ABC-Analyse für Tunnelbauwerke KGR 400

Der Ablauf zur Berechnung der zukünftigen Investitionskosten eines Objekts ist in Abbildung 6-14 dargestellt.

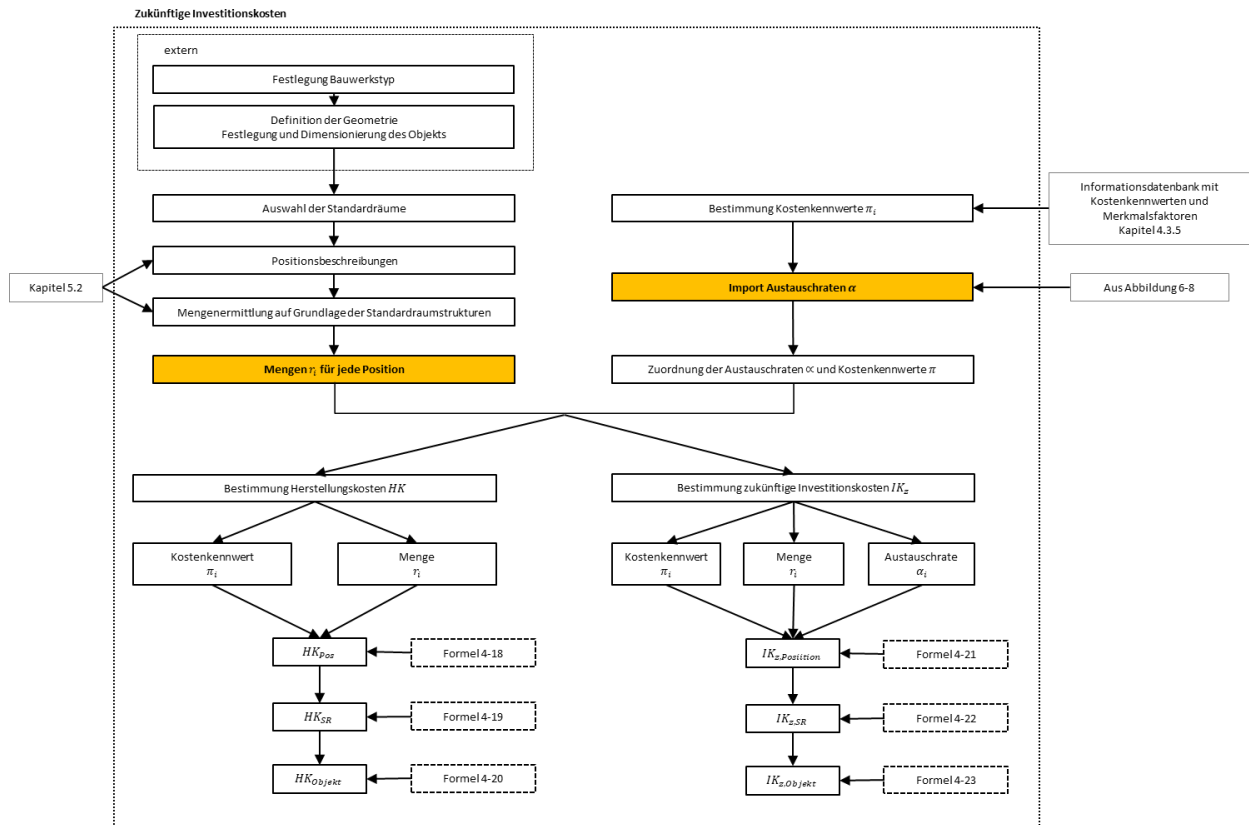


Abbildung 6-14: Ablauf zur Bestimmung der Investitionskosten

## 6.4 Zusammenfassung

Das Gesamtmodell der Arbeit ergibt sich aus den in diesem Kapitel vorgestellten Modellbestandteilen, welche miteinander verknüpft werden. In Abbildung 6-16 ist der Gesamtablauf über alle Teilbereiche dargestellt.

Die entwickelte Objektstruktur gliedert das Bauwerk in einzelne Bestandteile. Die entwickelten Instandsetzungsgruppen fassen Bauteile zusammen, welche physisch miteinander verbunden sind und in einer Maßnahme instandgesetzt werden. Die Objektstruktur stellt die Ausgangsbasis für die Bildung der Standardräume dar.

Das Modell ist mit einer Datenbank zu verknüpfen, welche sämtliche Informationen über die Lebensdauern und Einwirkungen der einzelnen Bauteile enthält. Diese Informationen liegen den Behörden i.d.R. vor und müssen einheitlich strukturiert werden. Mit Hilfe dieser Datenbank können Lebensdauerberechnung für die Bauteile nach dem vorgestellten Verfahren durchgeführt werden.

Die Eingabeparameter für das Modell beschränken sich auf die Objekteigenschaften und Standorteigenschaften des zu untersuchenden Objekts. Mit Hilfe der Objekteigenschaften kann die Ausstattung des Objekts bestimmt werden. Die Standorteigenschaften beeinflussen die Lebensdauer der Bauteile. Diese Eingabeparameter liegen zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung bereits vor. Durch die Standardisierung der einzelnen

Funktionseinheiten kann das Modell bereits in frühen Phasen angewendet werden. Auf Basis der internen und externen Parameter ermittelt das Modell die Herstellungskosten sowie zukünftigen Investitionskosten für das Objekt unter Berücksichtigung verschiedener Instandhaltungsstrategien.

Diese Arbeit konzentriert sich hauptsächlich auf Vergleiche von verschiedenen Kombinationen von Instandsetzungsmaßnahmen und Strategien. Hierfür stehen einheitliche Eingangsparameter zur Verfügung. Die absolute Höhe dieser Eingangsparameter vor allem der Kostenkennwerte kommt damit nur eine untergeordnete Rolle zu. Die Auswertungen sollen viel mehr relative Ergebnisunterschiede aufzeigen, die sich durch die Anwendung verschiedener Instandhaltungsstrategien und die Kombination verschiedener Maßnahmen ergeben.

Das Modell wird auf den Bereich der Verkehrsinfrastruktur angewendet, kann aber auch auf andere Bereiche der materiellen Infrastruktur übertragen werden. Ebenso kann eine Anwendung im Bereich der sozialen Infrastruktur stattfinden. Voraussetzung für die Anwendung ist, dass das zu untersuchende Objekt derartig zerlegbar sein muss, wie die Methodik in Kapitel 4 es vorgibt.



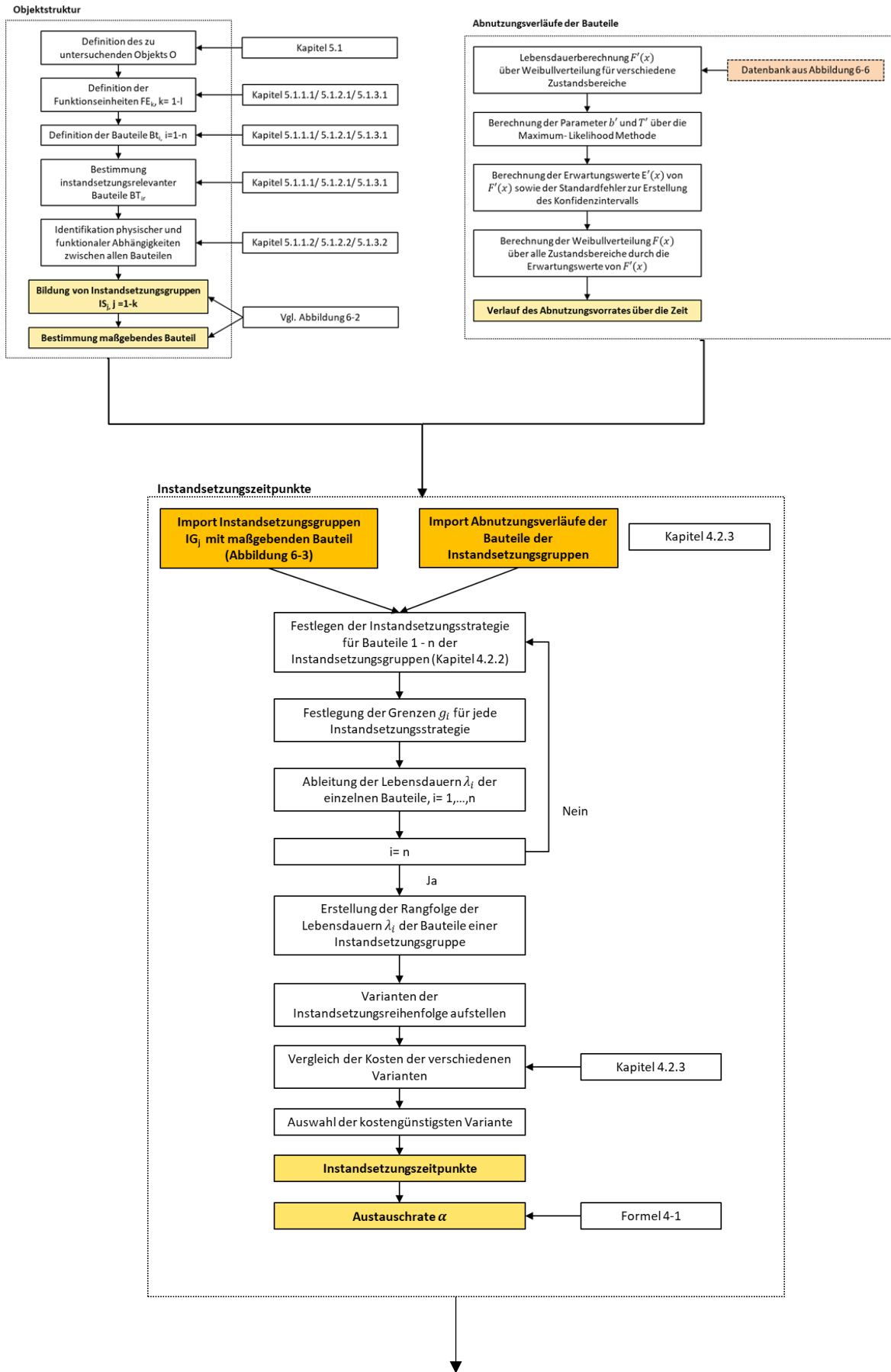


Abbildung 6-15: Gesamtablauf über alle Teilbereiche Teil 1

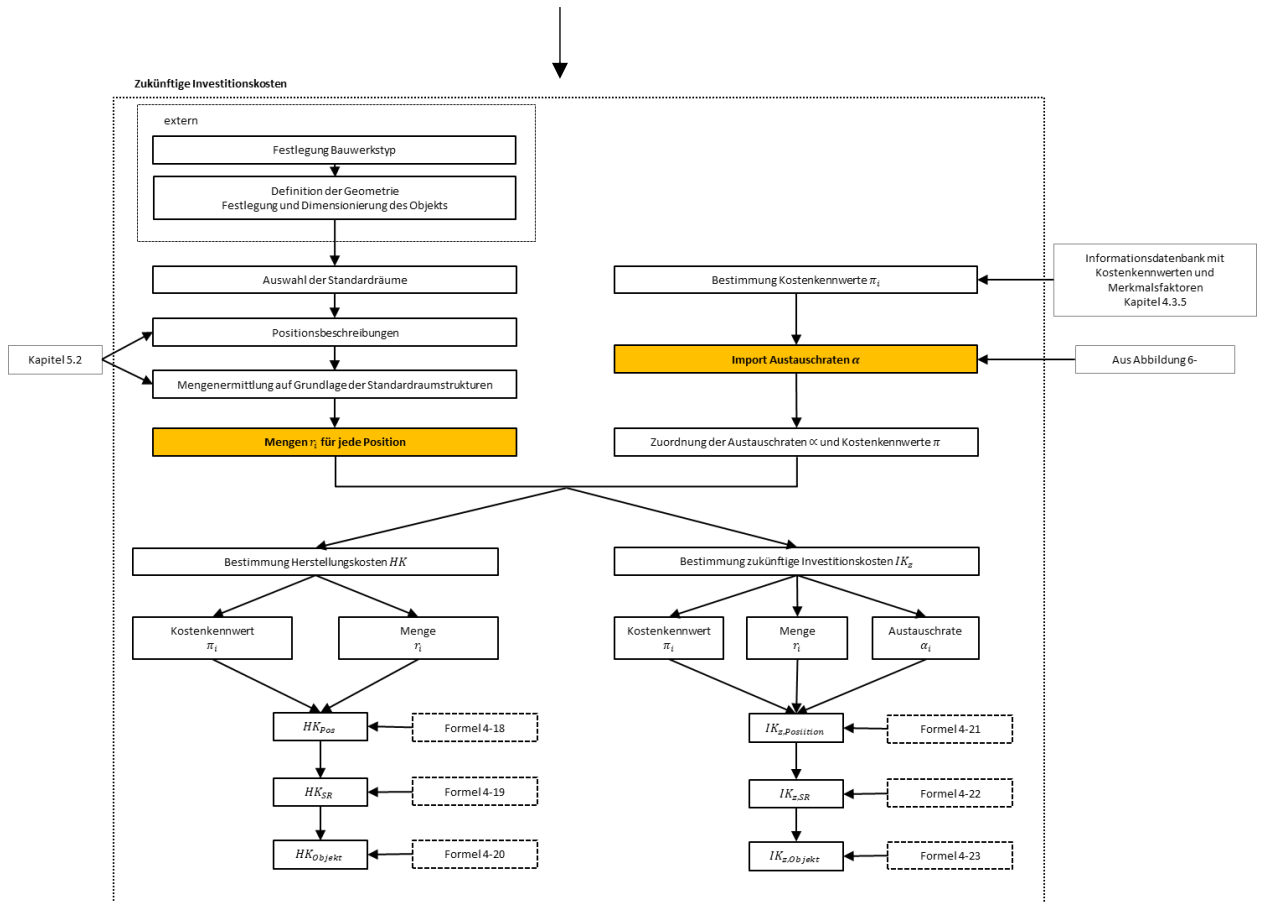


Abbildung 6-16: Gesamtablauf über alle Teilbereiche Teil 2

## 7 Beispiel zur Anwendung des Modells

In den vergangenen Kapiteln wurde ein Modell für die Berechnung der Herstellungskosten und zukünftigen Investitionskosten von Infrastrukturbauwerken entwickelt. Dieses wird am Beispiel von einem fiktiven Bauwerk angewendet und die Ergebnisse untersucht.

Die Operationen zur Bestimmung der Herstellungskosten und zukünftigen Investitionskosten werden in einem Ablaufplan dargestellt. Notwendige Modellbestandteile sind die Ermittlung der Kosten mit Hilfe der Standardraumstrukturen sowie die Ermittlung des Instandsetzungszeitpunktes zur Berechnung der zukünftigen Investitionskosten. Der Ablauf erfolgt nach dem in Abbildung 6-16 dargestellten Flussdiagramm.

### 7.1 Eingabe

Für die Anwendung des Modells sind die planerischen Festlegungen aus der Vorplanung notwendig. Die Objekteigenschaften des hier untersuchten Objekts orientieren sich an dem tatsächlichen Bestand in Deutschland. Als Beispielprojekt wird eine fiktive Autobahnbrücke im Zuge der Bundesautobahn 60<sup>475</sup> aus Spannbeton mit Hohlkasten Querschnitt und einer Länge von 350 m untersucht. Die Überbauten werden als Durchlaufträger ausgeführt. Hergestellt wird die Brücke im Taktschiebverfahren. Die Breite zwischen den Geländern beträgt 35,00 m. Die Hohlkästen haben eine konstante Konstruktionshöhe von 2,50 m. Die Brücke besteht aus zwei getrennten Überbauten und aus insgesamt acht Feldern mit einer maximalen Stützweite von 45,00 m. Die Brücke ist auf 14 Pfeilern und zwei Widerlagern aufgelagert, welche massiv in Ortbetonbauweise ausgeführt werden. Die Lagerung der Brücke auf dem Unterbau erfolgt durch Kalottenlager. Fahrbahnübergangskonstruktionen befinden sich an den Brückenenden über die gesamte Breite. Die kleinste lichte Höhe beträgt 5,80 m. Aufgrund der Größe und der Lage der Brücke ist eine Tiefgründung bestehend aus Bohrpfehlen notwendig. Die Gesamtnutzungsdauer ergibt sich aus dem Funktionsbetrieb und wird für dieses Beispiel auf 100 Jahre festgelegt. Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2 zeigen jeweils den Querschnitt sowie die Ansicht der untersuchten Brücke.

---

<sup>475</sup> Die BAB 60 ist eine deutsche Autobahn, die in zwei nicht miteinander verbundenen Teilstrecken von der belgischen Grenze bei Winterspelt über Wittlich, Bingen und Mainz nach Rüsselsheim führt.

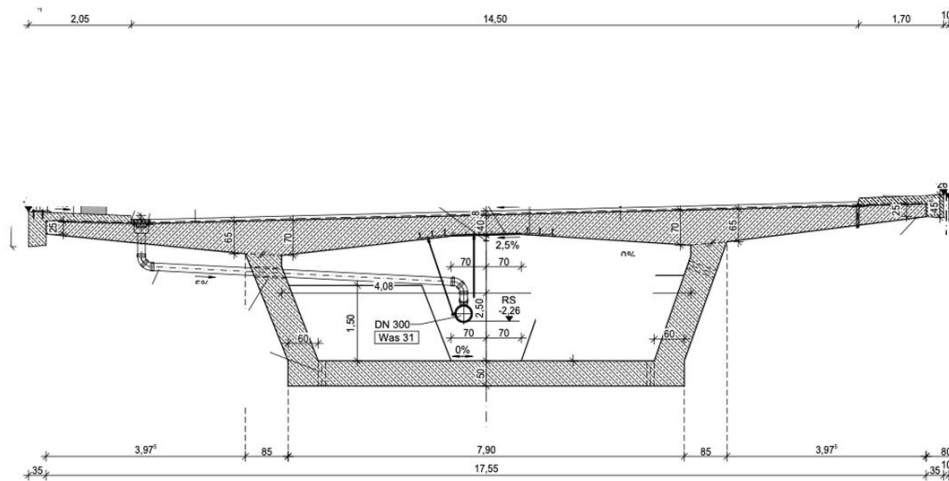


Abbildung 7-1: Querschnitt der untersuchten Brücke

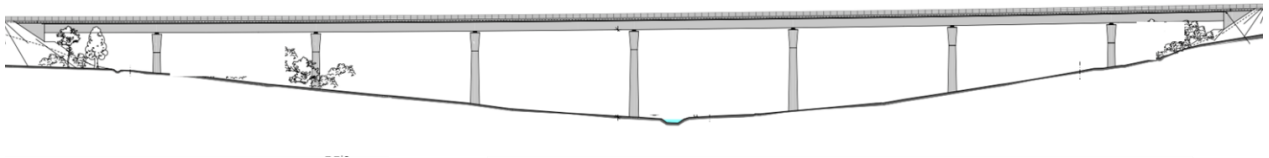


Abbildung 7-2: Ansicht der untersuchten Brücke

In Abbildung 7-3 ist die Eingabemaske des Modells mit allen für die Berechnung erforderlichen Eingabeparametern dargestellt, die sich aus den oben beschriebenen Objekteigenschaften sowie den Bauwerksplänen ergeben. Einige der erforderlichen Eingabeparameter müssen von anderen Projektbeteiligten wie dem Tragwerksplaner geliefert werden. Hierunter fallen u.a. die Abmessungen des Querschnitts des Überbaus, der Bewehrungsgrad für den Unter- und Überbau sowie die Ausführung der Tiefgründung. Diese Angaben sind für eine exakte Kostenberechnung essenziell.

Bauwerksdaten	
Objekt	Brücke
Baumaterial	Spannbeton
Bauwerksart	Hohlkasten
Gesamtlänge	350,00 m
Breite	18,05 m
Anzahl Pfeiler	14 Stück
Anzahl Überbauten	2 Stück
Bauverfahren	
Schweres Traggerüst	○
Leichtes Traggerüst	○
Taktschieben	●
Vorschubrüstung	○
Freivorbau	○
Gründung	
Flachgründung	○
Pfahlgründung	●
Durchmesser	1,50 m
Gesamtlänge der Pfähle	2883,00 m
Bewehrungsgrad Fundamente	0,12 kg/m <sup>3</sup>
Bewehrungsgrad Pfahlkopfplatte	0,12 kg/m <sup>3</sup>
Überbau	
Bewehrungsgrad	0,14 t/m <sup>3</sup>
Spannstahl	14,06 kg/m
Konstruktionshöhe	2,50 m
Dicke der Platte	0,55 m
Dicke der Stege	0,50 m
Länge der Kragarme	3,98 m
Unterbau	
Höhe Pfeiler 1+2	10,00 m
Höhe Pfeiler 3+4	15,00 m
Höhe Pfeiler 5+6	20,00 m
Höhe Pfeiler 7+8	25,00 m
Höhe Pfeiler 9+10	20,00 m
Höhe Pfeiler 11+12	15,00 m
Höhe Pfeiler 13+14	10,00 m
Bewehrungsgrad Pfeiler	0,12 t/m <sup>3</sup>
Höhe der Widerlager	10,00 m
Bewehrungsgrad Widerlager	0,14 kg/m <sup>3</sup>

Abbildung 7-3: Eingabemaske des Modells

Für die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten sind neben den in Abbildung 7-3 dargestellten Objekteigenschaften Angaben zu Lebensdauern und Instandhaltungsstrategien der Bauteile zu machen.

Um die physischen Abhängigkeiten zwischen Bauteilen zu berücksichtigen, wurden in Kapitel 5.1 Instandsetzungsgruppen gebildet. Diese sind im Modell hinterlegt und werden für die Berechnungen übernommen.

Die technischen Lebensdauern der Bauteile werden über den Verlauf des Abnutzungsvorrates berechnet, welcher durch eine Weibullverteilung beschrieben wird. Diese Verteilungsfunktion ergibt sich nach dem in Abbildung 6-7 dargestellten Verfahren. Für die Anwendung des Verfahrens sind Daten zu Lebensdauern von Bauteilen aus einer Datenbank zu importieren. Diese Datenbank sollte von jeder Organisationseinheit gemäß Kapitel 5.3 geführt werden, da sie notwendige Informationen für die Kostenberechnung enthält. Mit Hilfe der Datenbank können die benötigten Parameter der Verteilung berechnet und in das Modell eingegeben werden.

Da eine solche Datenbank für die Auswertung im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung stand, wurden für die benötigten Parameter der Weibullverteilung Annahmen getroffen, um den Verlauf des Abnutzungsvorrates abzubilden. Den Überlegungen liegt die Annahme zu Grunde, dass es sich bei allen Bauteilen um Verschleißausfälle handelt und der Formparameter  $b$  somit größer als eins sein muss (vgl. Kapitel 3.5.3). Für Bauteile, auf welche die Nutzungsintensität direkten Einfluss hat wie bspw. der Deckschicht oder der Fahrbahnübergänge, wird angenommen, dass der Abnutzungsvorrat zu Beginn schneller abnimmt als bei Bauteilen, welche nicht direkt der Nutzungsintensität ausgesetzt sind (Abdichtung, Entwässerung etc.).<sup>476</sup> Der Formparameter  $b$  wird dementsprechend angepasst. Der zweite Parameter der Verteilung bestimmt die Lage der Verteilung bezüglich der Zeitachse und wird auf Basis der Angaben des Lebensdauermodells des Bund-Länder Fachausschusses sowie des Modells nach Schmuck/Löffler gewählt. Für Bauteile der Baukonstruktion gilt die Annahme einer unendlichen Lebensdauer. Daher werden für diese Bauteile keine Abnutzungskurven erstellt.

Die Instandsetzungskosten werden für verschiedene Varianten von Instandhaltungsstrategien berechnet. Die Instandhaltungsstrategie gilt als wesentlicher Einflussfaktor auf die Lebensdauer und ist daher für die Ermittlung der zukünftigen Investitionskosten anzugeben. Sie entscheidet, zu welchem Zeitpunkt das Bauteil ausgetauscht wird (vgl. Kapitel 3.1.2).

Die erste untersuchte Variante stellt den aktuellen Status Quo der Instandsetzung der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland dar und verfolgt einen korrektiven Ansatz. Das bedeutet, dass eine Maßnahme erst stattfindet, wenn ein entsprechendes Bauteil seine Funktion nicht mehr erfüllt. Daher wird jedes Bauteil gemäß der aufgeschobenen Strategie instandgesetzt. Bei dieser Strategie wird bewusst eine Reduzierung der Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit in Kauf genommen.

---

<sup>476</sup> Vgl. Spinner, Sebastian: Untersuchung des Einflusses der Nutzungsintensität auf die Lebensdauer von Bauteilen von Infrastrukturbauwerke der KGR 300 und 400. Master's Thesis. Technischen Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2018, S. 136-137.

Das Gegenteil zum Status Quo stellt eine vorausbestimmte Instandsetzung dar. Es wird ein uneingeschränkt aktives Instandhaltungsmanagement unterstellt. Dies stellt die zweite untersuchte Variante dar. Hier wird vorab ein Grenzwert definiert, ab dem eine Maßnahme durchgeführt wird. Das Durchführen von Maßnahmen findet somit frühzeitig vor dem berechneten Schadenseintritt statt. Diese Strategie bildet rein volkswirtschaftlich die beste Lösung, da so eine durchweg hohe Verfügbarkeit gewährleistet wird. Bei dieser Strategie wird jedem Bauteil eine vorausbestimmte Instandhaltung zugeordnet und ab einer Überlebenswahrscheinlichkeit von 75 % instandgesetzt.

Als dritte Variante werden die Kosten untersucht, die sich durch Anwendung einer Mischstrategie nach ZIEGEL ergeben. Jedem Bauteil wird gemäß der Kritikalitätsbestimmung nach ZIEGEL eine eigene Instandhaltungsstrategie zugeordnet. Die Instandhaltungsstrategien können unter Berücksichtigung der von ZIEGEL definierten Kritikalitätsmatrix den Bauteilen zugeordnet werden (vgl. Kapitel 3.1.3). Die Kritikalitätsmatrix verknüpft die Funktionseinheiten mit den empfohlenen Handlungsstrategien. Die Zuordnung der Strategien in den Matrizen nach ZIEGEL orientiert sich zum einen an der Kritikalität einer Funktionseinheit, zum anderen an der sozioökonomischen Bedeutung der einzelnen Autobahnen. Das führt dazu, dass die definierte Strategie für eine Funktionseinheit bei unterschiedlichen Autobahnen abweichen kann.

Die einzelnen Strategien werden durch definierte Grenzen voneinander unterschieden. Den von ZIEGEL definierten Instandhaltungsstrategien werden Grenzen  $g_i$  für die Erneuerung zugeordnet. Der Zeitpunkt der Maßnahme der verschiedenen Strategien orientiert sich an dem noch vorhandenen Abnutzungsvorrat bzw. an der Überlebenswahrscheinlichkeit. Das Maximum beträgt 100 %, das Minimum wird zu 2,5 % festgelegt. Den Instandhaltungsstrategien werden für die Anwendung des Modells folgende Bereiche der Überlebenswahrscheinlichkeit zugeordnet:

- $75 \% > R(t) > 50 \%$  vorausbestimmte Instandhaltung
- $50 \% > R(t) > 25 \%$  zustandsorientierte Instandhaltung
- $25 \% > R(t) > 2,5 \%$  sofortige Instandhaltung
- $2,5 \% > R(t)$  aufgeschobene Instandhaltung

Abbildung 7-4 zeigt die Eingabedaten, welche zusätzlich zu denen aus Abbildung 7-3 vorzunehmen sind, um die zukünftigen Investitionskosten zu berechnen. Die Annahme der Gesamtnutzungsdauer für dieses Beispiel beträgt 100 Jahre (vgl. Kapitel 3.3.4, S. 61). Die technischen Lebensdauern der einzelnen Bauteile, welche über den Abnutzungsvorrat abgebildet werden, stehen in keinem Zusammenhang mit der angenommenen Gesamtnutzungsdauer.

Funktionseinheit	Parameter der Weibullverteilung		Strategie <sup>477</sup>
	b	T	
Überbau Stahlbeton	3	45	vorausbestimmte Instandhaltung
Fahrbahnübergang	3	13	zustandsorientierte Instandhaltung
Kalottenlager	4	21	zustandsorientierte Instandhaltung
Deckschicht Asphalt	3	10	zustandsorientierte Instandhaltung
Schutzschicht	4	11	zustandsorientierte Instandhaltung
Abdichtung	4	32	zustandsorientierte Instandhaltung
Entwässerung	4	22	zustandsorientierte Instandhaltung
Kappen	3	16	vorausbestimmte Instandhaltung
Schutzeinrichtungen	3	20	zustandsorientierte Instandhaltung
Betrachtungszeitraum	100 Jahre		

Abbildung 7-4: Eingabemaske zur Berechnung der zukünftigen Instandsetzungskosten

In Abbildung 7-5 ist der Abnutzungsverlauf eines Fahrbahnübergangs für dieses Beispiel nach der Weibullverteilung mit den Parametern  $b = 3$  und  $T = 13$  sowie der Instandsetzungsgrenze  $g_i$  dargestellt. Dem Fahrbahnübergang wurde eine zustandsorientierte Instandhaltung zugeordnet. Daraus ergibt sich die Instandsetzungsgrenze  $g_i$  zu 0,5.

<sup>477</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.



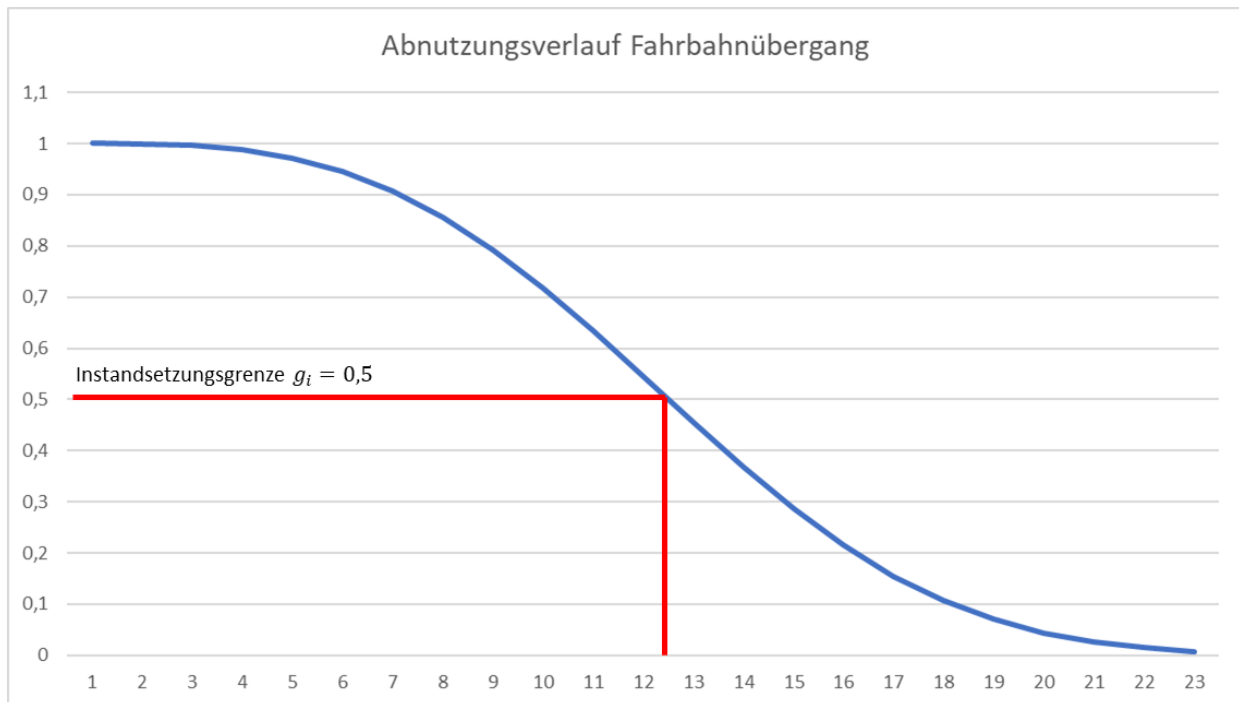


Abbildung 7-5: Abnutzungsverlauf des Bauteils Fahrbahnübergang mit Instandsetzungsgrenze  $g_i$ <sup>478</sup>

## 7.2 Festlegung der Standardräume

Aufbauend auf der Festlegung der Standardräume kann das Objekt zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung auf der Ebene von Bauteilen mengenmäßig beschrieben werden. Das Objekt lässt sich als Summe aller Bauteile darstellen. Grundlage für die Beschreibung des Objekts bilden die Standardräume, die durch die Objekteigenschaften und Abmessungen bestimmt werden.

Durch die Eingabe der benötigten Parameter (vgl. Abbildung 7-3) werden die notwendigen Standardräume ausgewählt und das Objekt zusammengestellt. Die Ausstattung des Objekts mit der Art und Anzahl der Bauteile wird durch die Standardräume festgelegt. Die Positionen, die das Beispielprojekt beschreiben, sind durch die Auswahl der Standardräume entsprechend der Definition der Standardräume festgelegt. Auf Basis der konkreten Geometrie des Objekts kann aus dem Katalog der Standardräume die Brücke zusammengesetzt werden. Die Mengen werden durch die Kombination der Grundannahmen und Objekteigenschaften über die hinterlegten positionsspezifischen Formeln ermittelt. Zwischenergebnis ist eine positionweise Mengenermittlung. Die Datenbank verknüpft die Eingabe mit den hinterlegten Kostenkennwerten. Aus der Multiplikation der Mengen mit den hinterlegten Kostenkennwerten ergeben sich die Kosten für jede Position. Die Summe über alle Positionen eines Standardraums ergibt die Kosten je Standardraum. Die Kosten des Objekts ergeben sich durch Aufsummierung der Kosten aller Standardräume.

Abbildung 7-6 zeigt das Vorgehen zur Bestimmung der Herstellungskosten.

<sup>478</sup> Vgl. Kapitel 4.3.1.

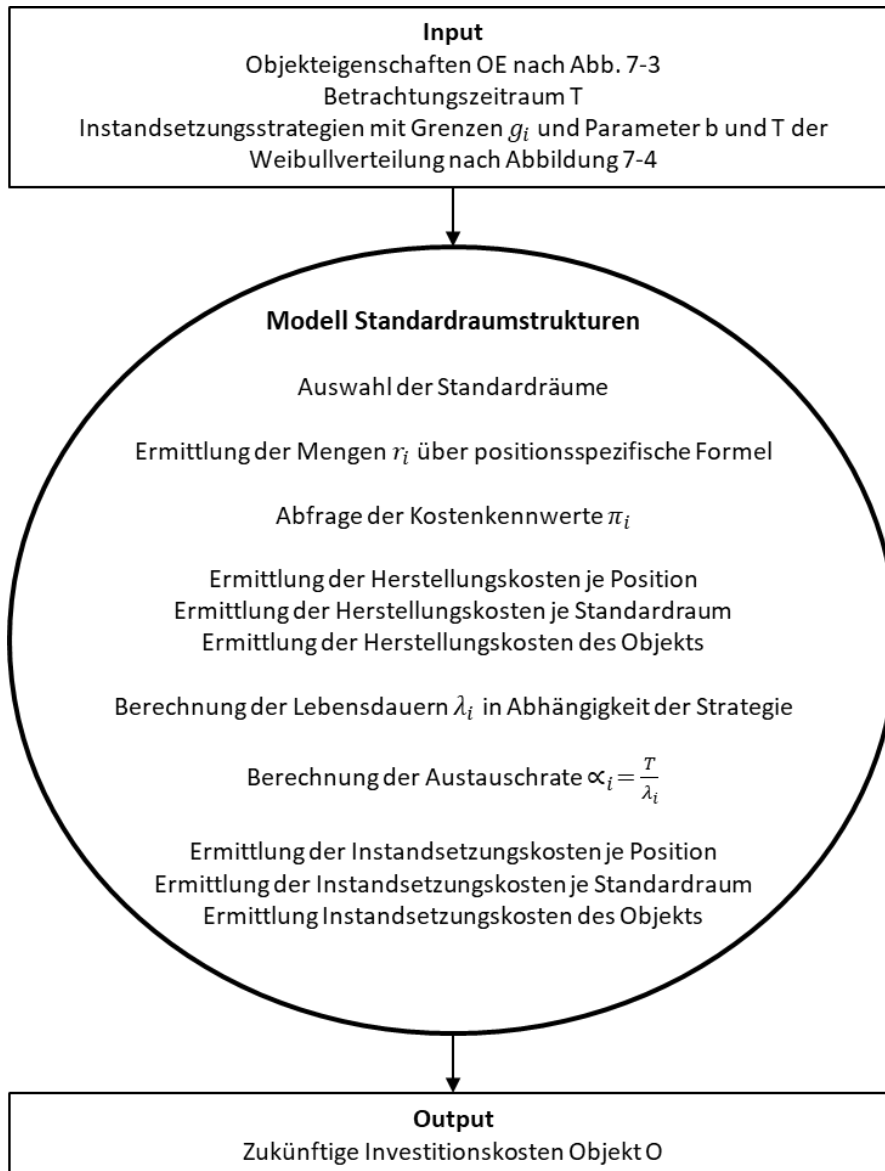


Abbildung 7-6: Ablauf zur Bestimmung der Herstellungskosten

### 7.3 Zuordnung von Kostenkennwerten

Die Berechnung der Kosten erfolgt anhand von Kostenkennwerten, welche für jede Position hinterlegt sind. Für die Beispielberechnung werden die benötigten Kostenkennwerte aus den Leistungsverzeichnissen der in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Referenzprojekte nach der Methodik aus Kapitel 4.4.5.1 ermittelt. Die Referenzprojekte bestehen aus bepreisten Leistungsverzeichnissen sowie Angebots-LVs mit Preisspiegeln, welche die Angebotspreise aller für das jeweilige Projekt bietenden Unternehmen enthalten. Es wird eine Kostendatenbank angelegt, in welche die Informationen der Projekte eingetragen und die statistischen Kennwerte berechnet werden. Für die Bildung der Kostenkennwerte werden die makroökonomischen Einflussfaktoren Baujahr und Standort mittels Faktoren berücksichtigt. Aus den Baubeschreibungen bzw. den Bauzeitenplänen wird das Jahr und das Quartal des Baubeginns herausgelesen und in der Kostendatenbank hinterlegt. Dies dient als Nachschlagewert für den

zugehörigen Baupreisindex für den Ingenieurbau in der Tabelle des Statistischen Bundesamtes.<sup>479</sup> Die Standardräume mit den berechneten Kostenkennwerten befinden sich im Anhang dieser Arbeit. Die Ermittlung der angegebenen Einheitspreise für die Positionen erfolgte für das Jahr 2022 für die Berechnung des Beispielprojekts.

Die Darstellung der Auswertung erfolgt anhand des Boxplots, des Medians und der Standardabweichung. Zusätzlich wird der Variationskoeffizient der Positionen berechnet, um die Streuung der Daten um den Mittelwert unabhängig von der Maßeinheit zu beschreiben. Aufgrund der unterschiedlichen Datenquellen der diversen behandelten Objekte gestaltet sich das Gesamtbild der Kostenkennwerte teilweise uneinheitlich. Die graphische Ergebnisdarstellung erfolgt im Laufe der Quantifizierung aus Gründen der Übersichtlichkeit nur für einzelne Positionen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Netto-Werte.

Für die Position „*Stahlbeton Kappen C 25/30*“ und die Position „*Kappen Bewehrung B500B*“ sind in Abbildung 7-7 die Kostenkennwerte dargestellt. Die Bewehrung der Kappe ist pro Tonne angegeben, der Beton pro m<sup>2</sup>.

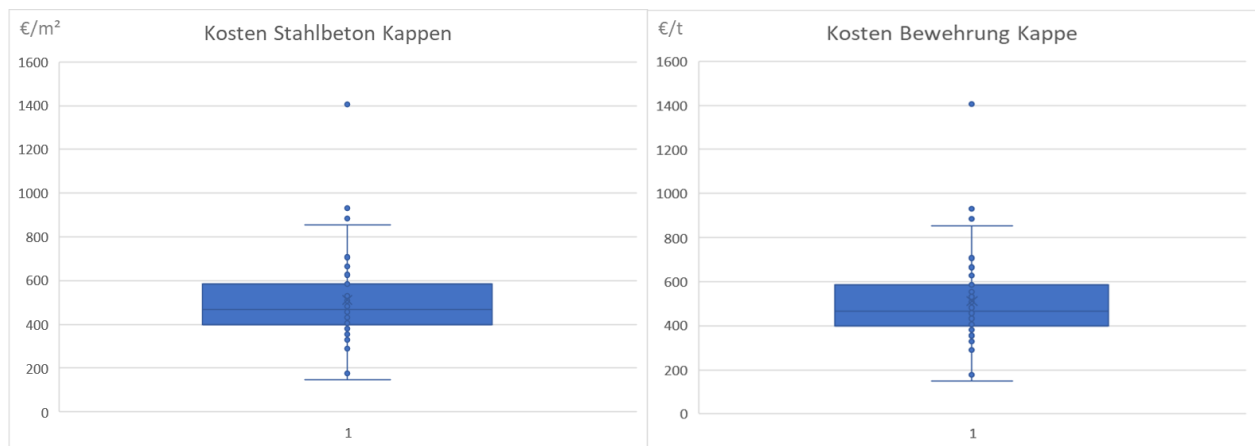


Abbildung 7-7: Kosten für Positionen „Kappe Stahlbeton“ (links) und „Kappe Bewehrung“ (rechts)

In der Boxplot-Darstellung ist eine Streuung der Kostenkennwerte zu erkennen. Der geringste Wert für die Position Stahlbeton beträgt 141,31 €/m<sup>2</sup>, während der Maximalwert bei 825,84 €/m<sup>2</sup> liegt. Dabei berechnet sich ein Median von 466,28 €/m<sup>2</sup>. Das untere Quartil Q1 mit 398,01 €/m<sup>2</sup> und das obere Quartil Q3 mit 596,15 €/m<sup>2</sup> führen zu einer vergleichsweise hohen Spannweite von 198,14 €/m<sup>2</sup>. Die Standardabweichung beträgt 128,09 €/m<sup>2</sup>. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Position der Bewehrung. Die Spannweite zwischen dem ersten und dem dritten Quantil beträgt 146,21 €/t. Für die Position der Bewehrung der Kappe wurden drei Ausreißer identifiziert, so dass sich ein Minimum von 790,79 €/m<sup>2</sup> und ein Maximum von 1.266,38 €/m<sup>2</sup> ergeben. Die Standardabweichung für diese Position beträgt 110,21 €/m<sup>2</sup>. Die einzelnen Kennzahlen sind in Tabelle 7-1 dargestellt.

<sup>479</sup> Vgl. Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Baupreisindizes für Straßenbau und Brückenbau. Internetquelle.

€/m <sup>2</sup>	1.Quantil	Median	3.Quantil	Maximum	Minimum	Standard-abweichung	Ausreißer
Kappe Stahlbeton C 25/30	398,013	466,28	569,15	825,84	141,31	128,09	854,20 884,64; 1.406,54
Kappe Bewehrung	900,86	967,10	1.047,07	1.266,38	790,79	110,21	161,27; 1.415,39; 1.528,04

Tabelle 7-1: Statistische Kennwerte für Positionen „Kappe Stahlbeton“ und „Kappe Bewehrung“

Abbildung 7-8 zeigt die Box-Plot Darstellung der Position „Abstreung der Schutzschicht“.

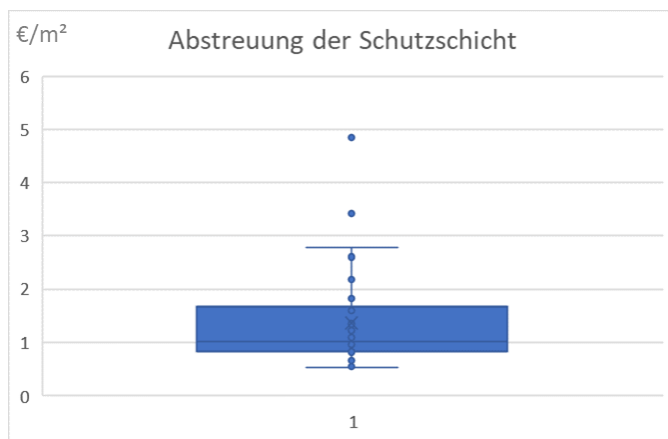


Abbildung 7-8: Kosten für Position „Abstreung der Schutzschicht“

Bei den Kostenkennwerten dieser Position wurden insgesamt zwei Ausreißer identifiziert. Für die Position der Abstreung der Schutzschicht beträgt das erste Quantil 0,89 €/m<sup>2</sup> und das dritte Quantil 1,88 €/m<sup>2</sup>, woraus sich eine Spannweite von 0,99 €/m<sup>2</sup> ergibt. Die Standardabweichung wurde zu 0,78 €/m<sup>2</sup> berechnet, der Median beläuft sich auf 1,15 €/m<sup>2</sup>. Die Kennzahlen sind in Tabelle 7-2 enthalten.

€/m <sup>2</sup>	1.Quantil	Median	3.Quantil	Maximum	Minimum	Standard-abweichung	Ausreißer
Abstreung der Schutzschicht	0,89	1,15	1,88	3,23	0,53	0,78	4,84, 3,42

Tabelle 7-2: Statistische Kennwerte für Position „Abstreung der Schutzschicht“

Die Variationskoeffizienten der Positionen sind in Abbildung 7-9 in einem Diagramm dargestellt. Die Abbildung gibt einen Überblick, bei welchen Positionen die Kostenkennwerte großen Streuungen unterliegen und bieten einen Anhaltspunkt über die Qualität der Aussage der Kostenkennwerte. Aufgrund der Übersichtlichkeit der Darstellung wurden die Positionen aufsteigend nach ihrem Variationskoeffizienten fortlaufend nummeriert. Die Zuordnung der Nummern zu den Positionen ist Abbildung 7-10 bis Abbildung 7-13 zu entnehmen. Die Ergebnisse zeigen, dass – obwohl die Kennwerte von Baujahr und Standort losgelöst wurden – diese hohen Schwankungen unterliegen. Bei insgesamt sechs Positionen ist die Standardabweichung größer

als der Mittelwert (Variationskoeffizient > 100 %). Diese Positionen sind größtenteils Positionen des Ausbaus.

Die starke Streuung der Werte ist auf unterschiedliche Aspekte zurückzuführen. Die Referenzprojekte wurden zum einen in unterschiedlichen Zeiträumen erstellt. Die Berücksichtigung des Baujahrs durch den Baupreisindex reicht nicht aus, um die Daten vergleichbar zu machen. Zum anderen handelt es sich bei den Daten um Werte, die durch Kalkulationen der Bauunternehmen zustande gekommen sind. Daher enthalten diese unterschiedlich hohe Umlagen, welche die Preise stark beeinflussen. Auch die unterschiedlichen Wettbewerbsansprüche der Bieter können ein möglicher Grund für die großen Streuungen sein, da für die Auswertung nicht nur beauftragte Leistungsverzeichnisse, sondern auch Angebots-LVs mit dazugehörigen Preisspiegeln zur Verfügung standen und nicht jedes Leistungsverzeichnis mit dem Ziel erstellt wurde, die Ausschreibung zu gewinnen. Weiterhin beeinflussen die in Kapitel 4.4.5.2 vorgestellten Merkmale die Kostenkennwerte maßgeblich.

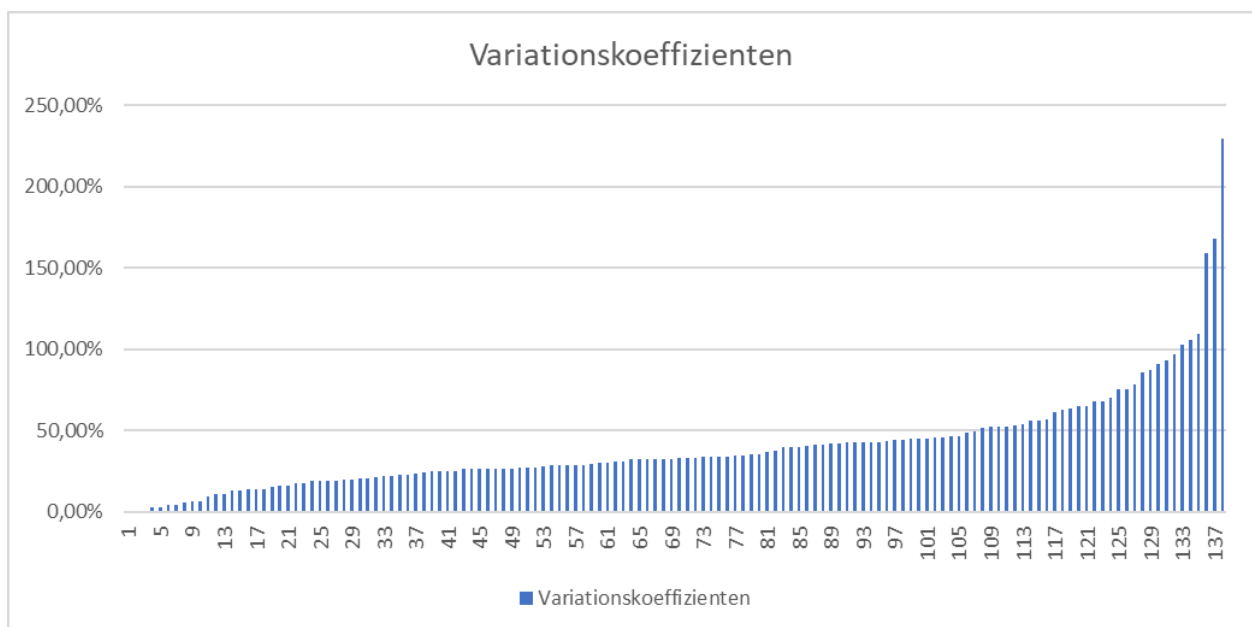


Abbildung 7-9: Variationskoeffizienten der Positionen

Position	Variationskoeffizienten	fortlaufende Nummerierung
Pfeilerkopfwässerung Rinne DN100, inkl. Edelstahlrohr DNN100 als Anschluss zur Sammelleitung	0,00%	1
Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN150 / Fallrohr	0,00%	2
Lagersockel aus Stahlbeton C35/45, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert	0,90%	3
Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN250 / Fallrohr	2,92%	4
Überbau anheben und absenken. Pressenansatz auf Auflagerbank.	2,98%	5
Lärmschutzwand Kantenschutz	4,73%	6
Abdeckung als Vogelschutz gem. RZ VES 1, einschl. ggf. erf. Stahlwinkelrahmen und Befestigungsteile, alle Stahlteile feuerverzinkt, Befestigungsteile und Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4571, zwischen Überbau und Widerlagerbank, Abdeckung aus Polycarbonat, 4 mm dick, Konstruktion direkt am Beton befestigen	4,73%	7
Abdeckung von Nischen in abnehmbaren Teilstücken aus eloxiertem Aluminiumblech, Blechdicke 3 mm, einschl. ggf. erf. Stahlwinkelrahmen und Befestigungsteile, alle Stahlteile feuerverzinkt, Befestigungsteile und Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4571	5,84%	8
Fundament Widerlager C30/37, mit Schalung	6,79%	9
Fundament aus Stahlbeton C30/37, XC2, XD2, XF2, XA1, inkl. Schalung, Bew. gesondert	6,79%	10
Fahrbahnübergang aus Asphalt, inkl. Einbaulehre, gem. ZTV-ING 8-2	9,40%	11
Pfahlköpfe von Ortbetonpfählen erschütterungsarm abarbeiten, Bewehrung säubern und ausrichten	11,21%	12
Fahrbahnübergang aus Stahllamellen, mit 5 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1	11,37%	13
Überbau aus Beton herstellen	13,01%	14
Überbau, Spannbeton C40/50 WA, mit Sichtflächenschalung, inkl. Nischen, Aussparungen	13,01%	15
Bewehrung Fundament Widerlager B500B	13,67%	16
Bewehrung, Betonstahl 500 S	13,67%	17
Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (zw. Böschungstreppe und Flügelwand)	13,82%	18
Trag- Arbeits und Schutzgerüst Brückenunterseite	15,83%	19
Schutzschicht aus Gussasphalt MA11S, d= 4cm, Einbau maschinell	16,29%	20
Schrammbord aus Granitbordstein Form A, gerade mit Anlauf, 180/120mm, auf Reaktionsharzbeton, Verankerung in Kappenbeton, gem. RIZ-ING Kap12	16,59%	21
Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN300 / Fallrohr	17,61%	22
Fahrbahnübergang aus Stahllamellen, mit 3 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1	17,75%	23
Brückenablauf 300x500, Abgang DN150, Schlammweimer aus Stahlblech, feuerverzinkt, gem. RIZ-ING Was1	18,81%	24
Dränschicht hinter Bauwerk, für Widerlager und Flügelwand, Dränmatte gem. RiZ-ING WAS 7	19,00%	25
Pfahlkopfplatte aus Stahlbeton C35/45, XC2, XD2, XF1, XA3, inkl. Schalung, Bew. gesondert	19,45%	26
Pfahlgründung aus bewehrten Ortbetonbohrpfählen, Stahlbeton C30/37, XC2, XD2, XA1, D = 120 cm, Pfahllänge von 7,50 bis 9,00 m, Pfahlneigung 10:1, Pfähle verrohrt bohren, Bew. gesondert, Leerrammungen bzw. Leerbohrungen bis 1 m je Pfahl	19,46%	27
Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN200 / Fallrohr	19,90%	28
Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (unten vor dem Widerlager)	20,22%	29
Fahrbahnübergang aus Stahllamellen, mit 4 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1	20,32%	30
Stahlgeländer, feuerverzinkt, H=110cm, Holmgeländer, Handlauf mit Drahtseil, Verankerung mit Fußplatte und Verbundankern	20,59%	31
Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen C30/37, H2 - W2, Mittelkappen	21,12%	32
Ausgleich unbewehrter Beton C12/15 X0, ohne Schalung	21,86%	33
Kalottenlager, einachsiger bewegliches Gleitteil, gem. DIN EN 1337-1 Nr.3.3 oder 3.4	22,41%	34
Schutzlage unter Kappen, Glasvlies-Bitumendachbahn V13	22,97%	35
Bewehrung Kappen B500B	23,05%	36
Bewehrung Widerlager, Betonstahl 500 S	23,56%	37
Entwässerungsrinne aus Gussasphalt MA8S, b=30cm	24,37%	38
Bewehrung Pfeiler, Betonstahl 500 S	24,95%	39
Verstärkungstreifen im Schrammbordbereich, b=30cm, edelstahlkaschierte Bitumenschweißbahn	24,98%	40

Abbildung 7-10 Variationskoeffizienten der Positionen – Teil 1

Position	Variationskoeffizienten	fortlaufende Nummerierung
Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche	25,12%	41
Fugenabdeckung zw. Mittelkappen, Fugenband aus Elastomer, gem. RIZ-ING Fug6	25,46%	42
Bewehrung, Betonstahl B 500 B	26,24%	43
Bewehrung Überbau B500B	26,24%	44
Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche	26,25%	45
Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche	26,25%	46
Fahrbahnübergang aus Stahllamellen, mit 1 Dichtprofil, gem. RIZ-ING Übe1	26,30%	47
Dichtungsabschlussband aus Elastomer, tieferliegendes Kragarmende unter Kappe, b=45cm, gem. ABD-N Detail FugArt3	26,74%	48
Verankerung Mittelkappen an Fahrbahnübergängen, Telleranker, gem. RIZ-ING Kap14	26,84%	49
Bewehrung, Betonstahl 500 S	27,04%	50
Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (oberes Ende Böschungstreppe)	27,33%	51
Elastomerlager, einachsig bewegliches Gleitteil, Festhaltekonstruktion für eine Achse, gem.DIN EN 1337-1 Nr.1.3	27,34%	52
Elastomerlager zweiachsig beweglich	28,41%	53
Oberboden abtragen	28,49%	54
Fugenband außenliegend, hor. Widerlager/Kammerwand, A250	28,53%	55
Rohrleitung für BW Entwässerung DN 200 Sammelleitung	28,58%	56
Höhenmesspunkte mit Kugelbolzen, feuerverzinkt	28,61%	57
Trag- Arbeits und Schutzgerüst Kappen	28,89%	58
Granithochbord (Einfassung Pflaster oberes Ende Böschungstreppe)	29,35%	59
Schutzeinrichtung herstellen. Konstruktion einfache Schutzplanke mit Pfosten Abstand 4m	30,36%	60
Bauwerk hinterfüllen, unter Vorfluthöhe, einbauen und verdichten, schwach durchlässiger Boden, gem. RiZ-ING Was7	30,42%	61
Pfeiler/Stützen ohne Auflagerbank und Lagersockel aus Stahlbeton C35/45, XC4, XD2, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert	30,76%	62
Gerätesatz für Pfähle	31,15%	63
Böschungstreppe 80cm, Stufen aus Granitsteinen auf 10 cm konstruktiv bewehrtem Unterbeton, RIZ-ING Bösch1	32,27%	64
Kratzspachtelung im Abdichtungsbereich herstellen	32,35%	65
Stahlgeländer, feuerverzinkt, H=110cm, Füllstabgeländer, Handlauf mit Drahtseil, Verankerung mit Fußplatte und Verbundankern	32,36%	66
Betonfertigteiltschacht ausbauen	32,47%	67
Bauwerk hinterfüllen, Entwässerungsbereich, einbauen und verdichten, grobkörniger Boden, gem. RiZ-ING Was7	32,49%	68
Deck- und Zwischenschicht abtragen	32,68%	69
Spannstahl für Längsvorspannung, 1660/1860 N/mm <sup>2</sup> , nachträglicher Verbund, Verpressmaterial in Hüllrohr einpressen, inkl. Hüllrohre, Umhüllungen, Durchführungen, Kopplungen, Anker und dgl.	33,05%	70
Bewehrung aus Spannstahl, Längsvorspannung, interne Spannglieder nachträglicher Verbund, 1660/1860 N/mm <sup>2</sup> , inkl. Hüllrohre, Durchführungen, Umlenkungen, Anker, Kopplungen	33,05%	71
Anschluss an bestehende Fahrbahndecken, Querfuge, mit anschluszbarem Fugenband	33,14%	72
Dichtungsschicht, Polymerbitumen-Schweißbahn ohne Metallkaschierung mit hochliegender Trägereinlage, inkl. Dichtungsanschluss an Einbauteile	33,69%	73
Fugenband außenliegend, hor. Überbau/Kammerwand od.Widerlager, AM250	33,88%	74
Elastomerlager, fest, gem.DIN EN 1337-1 Nr.1.6	34,12%	75
Granitbord (Anschluss an BW)	34,23%	76
Tropftüllen, inkl. Lochblech und Sickerschicht, gem. RIZ-ING Was11	34,41%	77
Korrosionsschutz Stahlgeländer, Sweepstrahlen, Zwischenbeschichtung EP, Deckbeschichtung PUR, Ausführung im Werk	34,65%	78
Kalottenlager, zweiachsig bewegliches Gleitteil, gem.DIN EN 1337-1 Nr.3.5	35,14%	79
Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt SMA8S, d=3,5-4cm	35,33%	80
Querleitung aus nichtrostendem Stahl, von Ablauf zu Sammelleitung, DN150, Gefälle 5%	37,04%	81
Kalottenlager, fest, gem.DIN EN 1337-1 Nr.3.1 oder 3.2	37,56%	82
Oberfläche Überbau behandeln, Maschinelle Glättung	39,83%	83
Oberfläche Überbau behandeln, Maschinelle Glättung	39,83%	84

Abbildung 7-11: Variationskoeffizienten der Positionen – Teil 2

Position	Variationskoeffizienten	fortlaufende Nummerierung
Kappe, Stahlbeton C25/30 WA + LP, mit Sichtflächenschalung, mit Besenstrich	40,01%	85
Entwässerungs- und Belüftungsöffnungen Hohlkasten in Steg, DN150 mit Vogelschutzgitter, RIZ-ING Was17	40,98%	86
Verankerung für Gesimskonsolen für Kappenschalung herstellen	41,39%	87
Kratzspachtelmasse aus Reaktionsharzmörtel liefern	41,70%	88
Gebundenen Oberbau aufbrechen	42,08%	89
Asphaltoberbau trennen	42,08%	90
Bewehrung, Betonstahl B 500 B, Ortbetonbohrpfähle	42,71%	91
Baugrube verfüllen, einbauen und verdichten, gemischtkörniger Boden	42,91%	92
Baugrube verfüllen, einbauen und verdichten, gemischtkörniger Boden	42,91%	93
Übergangskonstruktion für Schutzeinrichtung aus Beton von SE-Brücke auf SE-Strecke	42,94%	94
Fugenband außenliegend, vert. Raumfuge Widerlagerwand erdseitig, AM250 inkl. Fugeneinlage aus Hartschaumplatten, Fugenabschlussband, RIZ-ING Fug1	43,12%	95
Widerlager und Flügelwände einschl. Auflagerbank, Kammerwänden und Auskragungen aus Stahlbeton C30/37, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. Gesondert	43,88%	96
Baugrube herstellen, Aushub Bodenklasse 3 bis 5: leicht bis schwer lösbar	44,22%	97
Baugrube herstellen, Aushub Bodenklasse 3 bis 5: leicht bis schwer lösbar	44,22%	98
Energievernichtungsschacht 1,50x1,50m, Stahlbetonfertigteil C35/45, inkl. Schachtabdeckung	45,23%	99
Auflagersockel für Rückflächenentw. gem. RiZ-ING Was 7 aus unbewehrten Beton C12/15, inkl. einseitiger Schalung	45,41%	100
Abdichtung abbrechen	45,47%	101
Höhenmesspunkte mit Linsenkopfbolzen, (Senkniete), aus Messing	45,69%	102
Fugenband außenliegend, vert. Raumfuge Widerlagerwand luftseitig, AM250 inkl. Fugeneinlage aus Hartschaumplatten, Fugenabschlussband, RIZ-ING Fug1	46,01%	103
Randstreifen aus Gussasphalt MA8S, b=20cm	46,33%	104
Entwässerungsleitung ausbauen	46,56%	105
Fallrohr, aus nichtrostendem Stahl, DN300	48,60%	106
Entwässerungs- und Belüftungsöffnungen Hohlkasten in Boden, DN150 mit Vogelschutzgitter, RIZ-ING Was17	49,33%	107
Fugeneinlage hor. Kammerwand/Überbau, Hartschaumplatte 3cm	51,75%	108
AEK herstellen	52,28%	109
Auflagerbankentwässerung Rinne DN100, inkl. Austrittsrohre Edelstahl DN100 (gilt auch für Wartungsgangentwässerung)	52,46%	110
Lärmschutzwand H=2,70m, Stahlpfosten S235J, Wandelemente aus Acrylglas, mit Handlauf, inkl. Korrosionsschutz	52,67%	111
Fugenband herstellen. Zwischen Widerlager und Kammerwand.	52,89%	112
Abstreuerung der Schutzschicht	54,21%	113

Abbildung 7-12: Variationskoeffizienten der Positionen – Teil 3



Position	Variationskoeffizienten	fortlaufende Nummerierung
Fugereinlage vert. Kammerwand+Flügelwand)/Überbau, Hartschaumplatte 3cm	56,24%	114
Anschlussfuge an Fahrbahnübergang, Deck-/Schutzschicht, Fugenmasse Typ N2	56,55%	115
Verankerung Pfosten Lärmschutzwand auf Kappe, gem. RIZ-ING LS1	57,27%	116
Fugenabdeckung zw. Mittelkappen bei Fahrbahnübergang, Blechabdeckung, gem. ABD-N Detail Fug7	61,13%	117
Abstumpfen der Deckschicht, Abstreumaterial bitumenumhüllte Lieferkörnung 1/3, maschinell aufbringen	62,52%	118
Lagereinbau überwachen	63,32%	119
Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen C30/37, H2 - W4, Außenkappen	64,76%	120
Anschlussfuge an Entwässerungsrinne/Randstreifen, Deckschicht, Fugenmasse Typ N2	65,24%	121
AEK abbauen	67,99%	122
Anschlussfuge an Kappen, Deck- und Schutzschicht, Fugenmasse Typ N2	68,27%	123
Geländer ausbauen	70,03%	124
Betonoberfläche im Abdichtungsbereich strahlen, Kugelstrahlen, inkl. Reinigen	75,28%	125
Betonoberfläche strahlen, Kugelstrahlen, inkl. Reinigen	75,28%	126
Jahreszahl aus Naturstein in der Größe 455/255/50 mm herstellen und in Aussparung 475/275/70 mm versetzen	78,51%	127
Grundrohr DN150, inkl. Austrittsrohre Edelstahl DN150	85,72%	128
Geräuschmindernde Oberfläche für Fahrbahnübergang in Lamellenbauweise, ab 3 Dichtprofilen	87,19%	129
Bordsteine ausbauen	91,34%	130
Fuge in Kappen auf Kammerwand, Bewehrung unterbrechen, inkl. Fugereinlage und Fugenabschlussband, gem. RIZ-ING Fug3	93,08%	131
Kappen abbauen	96,97%	132
Übergangskonstruktion für Schutzeinrichtung aus Beton von SE-Brücke auf SE-Strecke herstellen	102,75%	133
Brückenablauf ausbauen	105,78%	134
Tropftülle ausbauen	109,25%	135
Asphalt fräsen	158,98%	136
Fahrbahnübergang ausbauen	168,34%	137
Lager ausbauen	229,50%	138

Abbildung 7-13: Variationskoeffizienten der Positionen– Teil 4

## 7.4 Implementierung des Modells in eine Simulation

Um die in Kapitel 6 vorgestellten Modellteile sowie die aufgezeigten Vernetzungen der Systeme zu untersuchen und die entsprechenden Berechnungen durchzuführen, wurde ein Simulationsmodell entwickelt. In Kapitel 3.6 wurden die Grundlagen der Modellbildung und Simulation aufgezeigt. Die Nutzungsdauer eines Bauteils stellt in diesem Modell eine Aktivität dar. Das Ereignis ist die Verringerung des Abnutzungsvorrates. Das Bauteil verlässt das System, sobald die festgelegte Instandsetzungsgrenze erreicht ist.

Um die Zustandsänderungen von Bauteilen abbilden zu können, wird auf eine ereignisorientierte Simulation zurückgegriffen (vgl. Kapitel 3.6). Das Gesamtsystem besteht aus den einzelnen Systemelementen bzw. Subsystemen, welche die Bauteile des Bauwerks abbilden. Die Struktur des Systems ist durch die Verflechtungen der einzelnen Bauteile untereinander festgelegt. Die zu berücksichtigenden Bauteile sowie deren Vernetzungen wurden in Kapitel 5.1 hergeleitet. Diese Bauteile werden in das Simulationsmodell implementiert und stellen die Subsysteme des Modells dar. Die Zustände der einzelnen Bauteile werden durch Attribute abgebildet, welche durch Wertbelegung den Systemzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben. Dabei erhält jedes Bauteil sein eigenes Attribut, welches den aktuellen Abnutzungsvorrat (AV) des Bauteils und die Information zur Instandsetzung darstellt. Die Überlebenswahrscheinlichkeit ergibt sich aus dem mit Hilfe des Verfahrens aus Kapitel 6.2 berechneten Abnutzungsverläufen der Bauteile.

Als Simulationssoftware wird das Programm ExtendSim verwendet. Dieses Programm ermöglicht es über verschiedene zur Verfügung stehende Bibliotheken vielfältige Arten der Simulation aufzubauen. Jede Bibliothek enthält eine Auswahl an Blöcken, welche verschiedene Sachverhalte abbilden können. Da es sich um ein englischsprachiges Simulationsprogramm handelt, werden die englischen Begriffe im weiteren Verlauf der Arbeit als Eigennamen übernommen. Die Items, welche mit Eigenschaften belegt werden, folgen der Vernetzung und durchlaufen die jeweiligen Blöcke. Die Items werden dabei anhand der ihnen zugewiesenen Werte durch das Modell gelenkt. Soll bspw. ein Prozess mit gewisser Dauer abgebildet werden, kann der Activity-Block gewählt werden. Dabei wird die Dauer über den Wert eines Attributs, einem konstanten Wert oder über einen Input Connector bestimmt. Je nach zu simulierendem Teilaspekt wird auf einen Block zurückgegriffen und in dem jeweiligen Block Parameter und Einstellungen getroffen.

Zu Beginn der Simulation wird die Simulationszeit auf null gesetzt und die Ausgangssituation festgelegt. Die vorgenommenen Instandsetzungen werden für alle Bauteile auf null gesetzt. Jedem Bauteil wird das Attribut „Abnutzungsvorrat (AV)“ zugewiesen und mit einem Wert belegt. Zu Beginn der Simulation beträgt der Abnutzungsvorrat 100 %. Der Abnutzungsvorrat vermindert sich mit jedem Simulationsschritt.

Die Instandsetzungsgruppen aus Kapitel 5.1 werden durch die Verknüpfungen der einzelnen Bauteile implementiert. Die Bauteile, welche einer Instandsetzungsgruppe angehören, werden miteinander verknüpft, so dass bei einer Instandsetzung des maßgebenden Bauteils alle mit diesen verbundenen Bauteilen ebenfalls instandgesetzt werden.

Ist keine Instandsetzung notwendig, wird das Item ohne Umwege mit dem noch vorhandenen Abnutzungsvorrat zurück in den Kreislauf geschickt.

Die räumliche Systemgrenze des Modells bildet das gesamte Bauwerk inklusive aller vorhandener Bauteile, welche in Kapitel 5.1 beschrieben wurden. An das Bauwerk angrenzende Straßenabschnitte sind nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Folgende weitere Annahme liegen basierend auf der in Kapitel 4 vorgestellten Methodik dem Modell zugrunde:

- Es erfolgt ein kompletter Austausch des Bauteils, so dass nach der Instandsetzungsmaßnahme die Lebensdauer wieder bei „0“ beginnt.
- Gegenstand des Modells sind Ermüdungs- und Verschleißausfälle, welche aufgrund des Alters einer Betrachtungseinheit auftreten.
- Die Lebensdauerverteilungen der Bauteile sowie die einzelnen Komponenten der Bauteile können als unabhängige identisch verteilte Zufallsgrößen angesehen werden.
- Der Verlauf des Abnutzungsvorrates lässt sich mit Hilfe einer Weibullverteilung beschreiben
- Die Lebensdauern für Bauteile der Baukonstruktion entsprechen der festgelegten Gesamtnutzungsdauer des Objekts.

Abbildung 7-14 zeigt den Ablauf der Simulation:

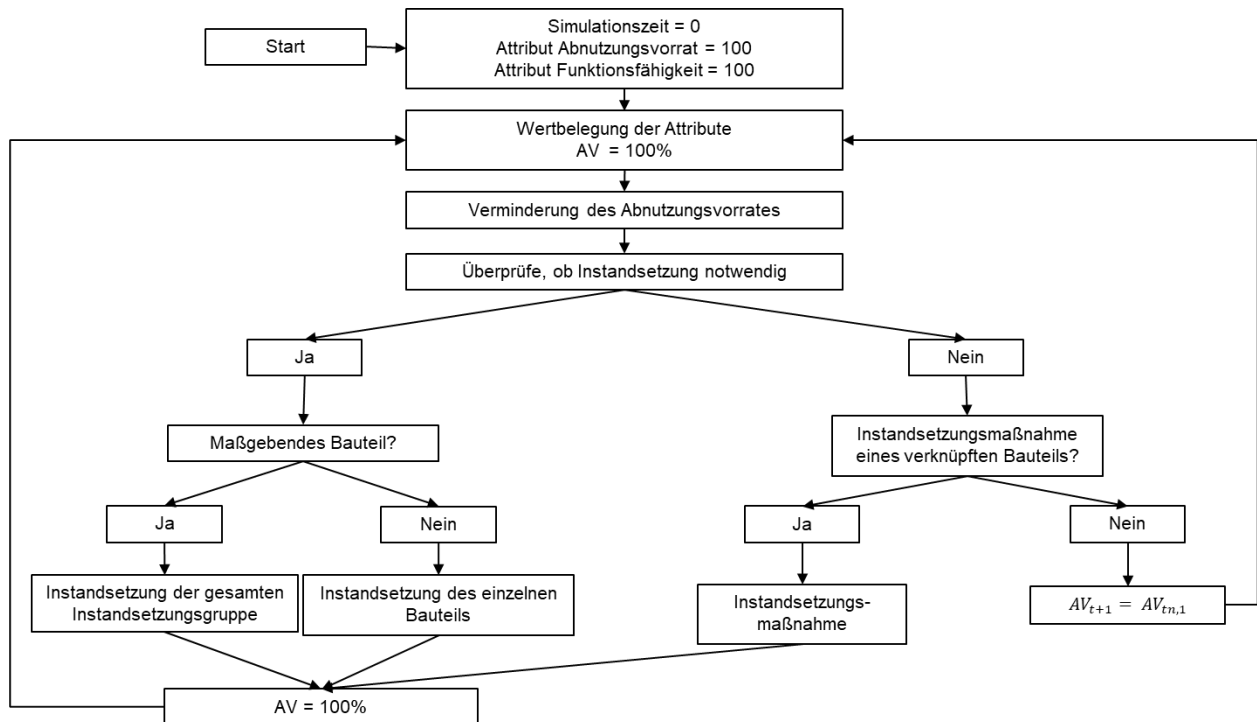


Abbildung 7-14: Ablaufschema der Simulation

Das Grundsystem des Modellaufbaus ist in Abbildung 7-15 dargestellt. Dieses Grundmodell bildet ein Bauteil mit seinen Attributen ab. In diesem Fall bestehen keine Abhängigkeiten zu anderen Bauteilen. Zunächst wird für jedes identifizierte Bauteil aus Kapitel 5.1 ein solches Modell erstellt. Dieses bildet die Ausgangsbasis für die weitere Modellentwicklung. Entsprechend der identifizierten Abhängigkeiten aus Kapitel 5.1 erfolgt eine Verknüpfung der einzelnen Grundmodelle miteinander.

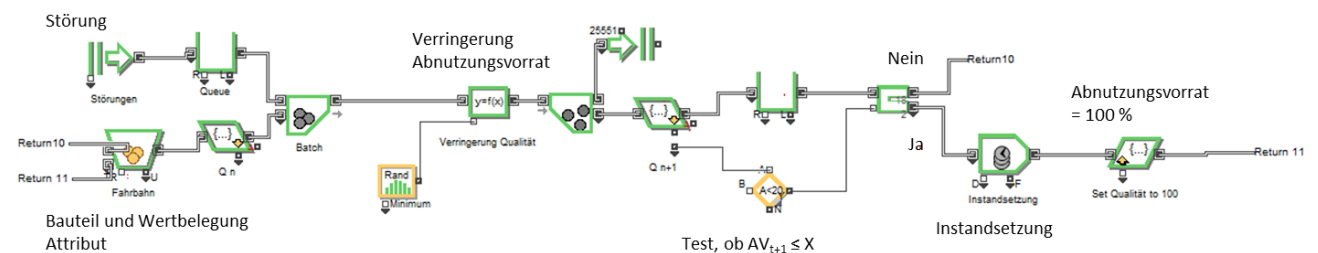


Abbildung 7-15: Grundmodell der Simulation

Die beiden wesentlichen Kennwerte, die im Zuge der Simulation ermittelt werden, sind die Austauschrate und die Nutzungsdauer der Bauteile. Hieraus ergeben sich die Instandsetzungskosten über die Gesamtnutzungsdauer des Objekts. Diese Daten werden in die Standardraumstruktur eingefügt und die Kosten bestimmt.

## 7.5 Ergebnis

### 7.5.1 Herstellungskosten nach Positionen

In Abbildung 7-16 bis Abbildung 7-27 sind die Ergebnisse der Standardräume mit den einzelnen Positionen und Mengen sowie Kostenkennwerten dargestellt. Das Objekt setzt sich aus den Standardräumen Gründung, Unterbau, Überbau, Erdbau, Traggerüste, Lager, Kappen, Fahrbahn, Fahrbahnübergang, Ausstattung Kappen, Böschungstreppe/ Pflaster und Entwässerung zusammen. Für alle für die Erstellung des Objekts relevanten Positionen wurden die Mengen durch die hinterlegten Formeln ermittelt. Positionen, die nicht für die Zusammensetzung des Objekts benötigt werden, erhalten als Eintrag die Menge „0,00“. Die Kostenkennwerte aus Kapitel 7.3 wurden den entsprechenden Positionen zugeordnet, so dass die Gesamtkosten je Position berechnet werden können. Die Positionen für das Herstellungsverfahren des Freivorbau enthalten keine Kostenkennwerte, da dieses Herstellungsverfahren nicht Bestandteil der in Kapitel 7.3 ausgewerteten Projekte war.

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	
108								1.075.687,09 €	
				<b>Erdbau Widerlager</b>				<b>965.023,34 €</b>	
108	Erdbau		01-01-01	Baugrube herstellen, Aushub Bodenklasse 3 bis 5: leicht bis schwer lösbar	20.804,37	m³	7,92 €	164.777,47 €	
			01-01-02	Bauwerk hinterfüllen, unter Vorfluthöhe, einbauen und verdichten, schwach durchlässiger Boden, gem. RIZ-ING Was7	7.933,00	m³	23,26 €	184.524,56 €	
			01-01-03	Bauwerk hinterfüllen, Entwässerungsbereich, einbauen und verdichten, grobkörniger Boden, gem. RIZ-ING Was7	21.583,38	m³	25,17 €	543.234,06 €	
			01-01-04	Baugrube verfüllen, einbauen und verdichten, gemischtkörniger Boden	4.043,74	m³	16,57 €	67.008,33 €	
			01-01-05	Oberboden abtragen	296,80	m²	18,46 €	5.478,93 €	
				<b>Erdbau Pfeiler</b>					<b>110.663,76 €</b>
			01-01-06	Baugrube herstellen, Aushub Bodenklasse 3 bis 5: leicht bis schwer lösbar	8.392,23	m³	6,75 €	56.673,60 €	
			01-01-07	Baugrube verfüllen, einbauen und verdichten, gemischtkörniger Boden	2.802,04	m³	14,47 €	40.546,10 €	
			01-01-08	Oberboden abtragen	728,28	m²	18,46 €	13.444,05 €	

Abbildung 7-16: Standardraum Erdbau

## Kapitel 7 Beispiel zur Anwendung des Modells

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
117								2.408.665,08 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Flachgründung Fundament unter Widerlager</b>				<b>386.356,68 €</b>
		Flachgründung	01-02-01	Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche	686,32	m²	12,42 €	8.523,75 €
			01-02-02	Fundament Widerlager C30/37, mit Schalung	1.469,16	m³	159,18 €	233.859,93 €
			01-02-03	Bewehrung Fundament Widerlager B500B	176,30	t	816,64 €	143.972,99 €
				<b>Flachgründung Fundament unter Stütze/Pfeiler</b>				<b>0,00 €</b>
			01-02-04	Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche	0,00	m²	12,60 €	0,00 €
			01-02-05	Fundament aus Stahlbeton C30/37, XC2, XD2, XF2, XA1, inkl. Schalung, Bew. gesondert	0,00	m³	159,18 €	0,00 €
			01-02-06	Bewehrung, Betonstahl 500 S	0,00	t	816,64 €	0,00 €
117	Gründung			<b>Tiefgründung mit Bohrpfahl unter Fundament</b>				<b>2.022.308,40 €</b>
		Tiefgründung	01-02-07	Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche	578,15	m²	12,60 €	7.286,54 €
			01-02-08	Pfahlkopfplatte aus Stahlbeton C35/45, XC2, XD2, XF1, XA3, inkl. Schalung, Bew. gesondert	2.578,05	m³	148,94 €	383.974,40 €
			01-02-09	Bewehrung, Betonstahl 500 S	309,37	t	949,03 €	293.598,61 €
			01-02-10	Pfahlgründung aus bewehrten Ortbetonbohrpfählen, Stahlbeton C30/37, XC2, XD2, XA1, D = 120 cm, Pfahllänge von 7,50 bis 9,00 m, Pfahlnäigung 10:1, Pfähle verbohrt bohren, Bew. gesondert, Leerarmungen bzw. Leerbohrungen bis 1 m je Pfahl	2.883,00	m	341,28 €	983.906,26 €
			01-02-11	Pfahlköpfe von Ortbetonpfählen erschütterungsarm abarbeiten, Bewehrung säubern und ausrichten	196,00	Stk.	187,23 €	36.696,47 €
			01-02-12	Bewehrung, Betonstahl B 500 B, Ortbetonbohrpfähle	320,00	t	970,27 €	310.486,13 €
			01-02-13	Gerätesatz für Pfähle	1,00	Stk.	6.359,99 €	6.359,99 €

Abbildung 7-17: Standardraum Gründung

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
118								1.658.008,87 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Tragende Konstruktionen</b>				<b>1.641.363,52 €</b>
		Widerlager	01-03-01	Pfeiler/Stützen einschl. Auflagerbank ohne Lagersockel aus Stahlbeton C35/45, XC4, XD2, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert	3.524,00	m³	296,89 €	1.046.247,15 €
			01-03-02	Widerlager und Flügelmwände einschl. Auflagerbank, Kammerwänden und Auskragungen aus Stahlbeton C30/37, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. Gesondert	1.469,10	m³	293,31 €	430.904,00 €
			01-03-03	Lagersockel aus Stahlbeton C35/45, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert	0,00	m³	1.348,07 €	0,00 €
			01-03-04	Bewehrung Pfeiler, Betonstahl 500 S	352,40	t	898,43 €	79.475,51 €
			01-03-06	Bewehrung Widerlager, Betonstahl 500 S	88,46	t	957,91 €	84.736,86 €
				<b>Nicht tragende Konstruktionen</b>				<b>1.339,43 €</b>
		01-03-06	Auflagersockel für Rückflächenentw. gem. RIZ-ING Was 7 aus unbewehrten Beton C12/15, inkl. einseitiger Schalung	4,04	m³	331,34 €	1.339,43 €	
			<b>Schutzbauteile</b>				<b>2.941,59 €</b>	
		01-03-07	Abdeckung als Vogelschutz gem. RZ VES 1, einschl. ggf. erf. Stahlwinkelrahmen und Befestigungsteile, alle Stahlteile feuerverzinkt, Befestigungsteile und Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4571, zwischen Oberbau und Widerlagerbank, Abdeckung aus Polycarbonat, 4 mm dick, Konstruktion direkt am Beton befestigen	2,00	Stk.	210,55 €	421,10 €	
		01-03-08	Abdeckung von Nischen in abnehmbaren Teilstücken aus eloxiertem Aluminiumblech, Blechdicke 3 mm, einschl. ggf. erf. erf. Stahlwinkelrahmen und Befestigungsteile, alle Stahlteile feuerverzinkt, Befestigungsteile und Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4571	10,00	m	252,05 €	2.520,49 €	
			<b>Vertikale Bauteile, sonstiges</b>				<b>3.489,00 €</b>	
		01-03-09	Jahreszahl aus Naturstein in der Größe 455/255/50 mm herstellen und in Aussparung 475/275/70 mm versetzen	2,00	Stk.	359,09 €	718,18 €	
		01-03-10	Höhenmesspunkte mit Kugelbolzen, feuerverzinkt	50,00	Stk.	26,04 €	1.301,76 €	
		01-03-11	Höhenmesspunkte mit Linsenkopfbolzen, (Senknie), aus Messing	80,00	Stk.	18,36 €	1.469,06 €	
			<b>Horizontale Bauteile, Beläge</b>				<b>8.875,14 €</b>	
		01-03-12	Fugeneinlage hor. Kammerwand/Oberbau, Hartschaumplatte 3cm	11,20	m²	32,90 €	368,48 €	
		01-03-13	Fugeneinlage vert. Kammerwand+Flügelwand/Oberbau, Hartschaumplatte 3cm	142,10	m²	34,33 €	4.878,50 €	
		01-03-14	Fugenband außenliegend, hor. Widerlager/Kammerwand, A250	28,00	m	50,10 €	1.402,76 €	
		01-03-15	Fugenband außenliegend, hor. Oberbau/Kammerwand od. Widerlager, AM250	28,00	m	51,75 €	1.449,09 €	
		01-03-16	Fugenband außenliegend, vert. Raumfuge Widerlagerwand luftseitig, AM250 inkl. Fugeneinlage aus Hartschaumplatten, Fugenabschlussband, RIZ-ING Fug1	7,50	m	51,75 €	388,15 €	
		01-03-17	Fugenband außenliegend, vert. Raumfuge Widerlagerwand erdseitig, AM250 inkl. Fugeneinlage aus Hartschaumplatten, Fugenabschlussband, RIZ-ING Fug1	7,50	m	51,75 €	388,15 €	

Abbildung 7-18: Standardraum Unterbau



## Kapitel 7 Beispiel zur Anwendung des Modells

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname				
113								951.211,33 €
123								
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Fahrbahn</b>				443.575,78 €
113	Fahrbahnbelag	Fahrbahn	01-07-01	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt SMA8S, d=3,5-4cm	10.010,00	m <sup>2</sup>	11,30 €	113.153,98 €
			01-07-02	Abstumpfen der Deckschicht, Abstreumaterial bitumenumhüllte Lieferkörnung 1/3, maschinell aufbringen	10.010,00	m <sup>2</sup>	0,29 €	2.873,47 €
			01-07-03	Schutzschicht aus Gussasphalt MA11S, d= 4cm, Einbau maschinell	10.010,00	m <sup>2</sup>	24,74 €	247.622,58 €
			01-07-04	Abstreuerung der Schutzschicht	10.010,00	m <sup>2</sup>	1,21 €	12.081,68 €
			01-07-05	Entwässerungsrinne aus Gussasphalt MA8S, b=30cm	700,00	m	36,78 €	25.747,71 €
			01-07-06	Randstreifen aus Gussasphalt MA8S, b=20cm	700,00	m	20,97 €	14.680,14 €
			01-07-07	Anschlussfuge an Kappen, Deck- und Schutzschicht, Fugenmasse Typ N2	1.400,00	m	12,83 €	17.965,61 €
			01-07-08	Anschlussfuge an Fahrbahnübergang, Deck-/Schutzschicht, Fugenmasse Typ N2	36,10	m	8,35 €	301,50 €
			01-07-09	Anschlussfuge an Entwässerungsrinne/Randstreifen, Deckschicht, Fugenmasse Typ N2	1.400,00	m	6,39 €	8.948,24 €
			01-07-10	Anschluss an bestehende Fahrbahndecken, Querfuge, mit anschluszbarem Fugenband	36,10	m	5,56 €	200,87 €
			01-07-11	Asphalt fräsen	10.010,00	m <sup>2</sup>	11,63 €	116.376,26 €
			01-07-12	Gebundenen Oberbau aufbrechen	10.010,00	m <sup>2</sup>	41,42 €	414.616,20 €
				<b>Abdichtung</b>				507.635,55 €
123		Abdichtung	01-07-13	Betonoberfläche im Abdichtungsbereich strahlen, Kugelstrahlen, inkl. Reinigen	12.635,00	m <sup>2</sup>	12,11 €	153.009,85 €
			01-07-14	Kratzspachtelung im Abdichtungsbereich herstellen	12.635,00	m <sup>2</sup>	9,65 €	121.885,63 €
			01-07-15	Kratzspachtelmasse aus Reaktionsharzmörtel liefern	12.635,00	m <sup>2</sup>	3,69 €	46.599,08 €
			01-07-17	Dichtungsschicht, Polymerbitumen-Schweißbahn ohne Metallkaschierung mit hochliegender Trägereinlage, inkl. Dichtungsanschluss an Einbauteile	12.635,00	m <sup>2</sup>	11,45 €	144.705,10 €
			01-07-18	Verstärkungsstreifen im Schrammbordbereich, b=30cm, edelstahlkaschierte Bitumenschweißbahn	1.400,00	m	12,24 €	17.134,78 €
			01-07-19	Schutzlage unter Kappen, Glasvlies-Bitumendachbahn V13	2.870,00	m <sup>2</sup>	7,59 €	21.797,39 €
			01-07-20	Fugenband herstellen. Zwischen Widerlager und Kammerwand.	18,05	m	59,17 €	1.068,02 €
			01-07-21	Fugenband herstellen. Zwischen Überbau und Kammerwand	18,05	m	79,54 €	1.435,70 €

Abbildung 7-22: Standardraum Fahrbahn

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname				
121								543.841,51 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Fahrbahnübergang</b>				543.841,51 €
121	Fahrbahnübergang	Einbau	01-08-01	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 1 Dichtprofil, gem. RIZ-ING Übe1		m	741,75 €	0,00 €
			01-08-02	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 3 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1		m	5.880,78 €	0,00 €
			01-08-03	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 4 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1	72,2	m	7.532,43 €	543.841,51 €
			01-08-04	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 5 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1		m	5.813,40 €	0,00 €
			01-08-05	Geräuschmindernde Oberfläche für Fahrbahnübergang in Lamellenbauweise, ab 3 Dichtprofilen		m	1.481,15 €	0,00 €

Abbildung 7-23: Standardraum Fahrbahnübergang

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
115								262.468,60 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Böschungstreppe und Pflaster</b>				262.468,60 €
115	Böschungstreppe und Pflaster	Einbau	01-09-01	Böschungstreppe 80cm, Stufen aus Granitsteinen auf 10 cm konstruktiv bewehrtem Unterbeton, RIZ-ING Bösch1	143,12	m	305,67 €	43.748,42 €
			01-09-02	Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (zw. Böschungstreppe und Flügelwand)	1.993,00	m <sup>2</sup>	99,90 €	199.103,72 €
			01-09-03	Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (oberes Ende Böschungstreppe)	11,28	m <sup>2</sup>	115,31 €	1.300,71 €
			01-09-04	Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (unten vor dem Widerlager)	21,10	m <sup>2</sup>	96,37 €	2.033,33 €
			01-09-05	Granitbord (Anschluss an BW)	198,82	m	76,89 €	15.287,05 €
			01-09-06	Granithochbord (Einfassung Pflaster oberes Ende Böschungstreppe)	15,28	m	65,14 €	995,38 €

Abbildung 7-24: Standardraum Böschungstreppe

## Kapitel 7 Beispiel zur Anwendung des Modells

LB	Funktionseinheit	Unterfunktions-einheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname					
121								523.008,03 €	
					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Schutzeinrichtung Beton</b>				<b>295.898,42 €</b>	
121	Ausstattung Kappen	Schutzeinrichtung Beton	01-11-01	Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen C30/37, H2 - W4, Außenkappen	700,00	m	210,26 €	147.183,01 €	
			01-11-02	Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen C30/37, H2 - W2, Mittelkappen	700,00	m	212,45 €	148.715,41 €	
				<b>Geländer/ Schutzeinrichtung</b>					<b>227.109,60 €</b>
		Geländer/ Schutzeinrichtung	01-11-03	Stahlgeländer, feuerverzinkt, H=110cm, Füllstabgeländer, Handlauf mit Drahtseil, Verankerung mit Fußplatte und Verbundankern	700,00	m	176,60 €	123.619,30 €	
			01-11-04	Stahlgeländer, feuerverzinkt, H=110cm, Holmgeländer, Handlauf mit Drahtseil, Verankerung mit Fußplatte und Verbundankern	0,00	m	110,49 €	0,00 €	
			01-11-05	Korrosionsschutz Stahlgeländer, Sweepstrahlen, Zwischenbeschichtung EP, Deckbeschichtung PUR, Ausführung im Werk	700,00	m	26,27 €	18.390,94 €	
			01-11-06	Schutzeinrichtung herstellen. Konstruktion einfache Schutzplanke mit Pfosten Abstand 4m	700,00	m	115,70 €	80.990,00 €	
			01-11-07	AEK herstellen	2,00	Stk	474,56 €	949,12 €	
01-11-08	Übergangskonstruktion für Schutzeinrichtung aus Beton von SE-Brücke auf SE-Strecke herstellen		2,00	Stk	1.580,12 €	3.160,24 €			

Abbildung 7-25: Standardraum Ausstattung Kappen

LB	Funktionseinheit	Unterfunktions-einheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname				
116								2.303.015,87 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Traggerüste</b>				<b>0,00 €</b>
116	Gerüste	Unterbau	01-12-04	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	373,55 €	0,00 €
			01-12-05	Arbeitsgerüst Widerlager		m²	139,31 €	0,00 €
		Überbau	01-12-06	Schweres Traggerüst Überbau, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m³	-	0,00 €
			01-12-07	Schweres Traggerüst Überbau, Mehrfeldbrücke		m³	7,87 €	0,00 €
			01-12-08	Leichtes Traggerüst Überbau		m³	-	0,00 €
			01-12-09	Überbau absenken, mittels Pressen und Abstapelung		m²	-	0,00 €
		Kappen	01-12-10	Schweres Traggerüst Kappen		m	-	0,00 €
			01-12-11	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	-	0,00 €
			01-12-12	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	71,61 €	0,00 €
			01-12-13	Verankerung Konsolgerüst		m	66,05 €	0,00 €
				<b>Taktschiebeverfahren</b>				
		Unterbau	01-12-14	Arbeitsgerüst Pfeiler	100,00	m	373,55 €	37.355,33 €
			01-12-15	Arbeitsgerüst Widerlager	358,00	m²	139,31 €	49.872,00 €
		Überbau	01-12-16	Fertigungs-, Vorfertigungs- und Verschiebeeinrichtung für die Herstellung der beiden Überbauten im Taktschiebeverfahren.	25.760,00	m²	67,13 €	1.729.223,18 €
			01-12-17	Vorbauschnabel	25.760,00	m²	11,41 €	293.842,25 €
		Kappen	01-12-19	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	292,96 €	0,00 €
			01-12-20	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke	1.400,00	m	71,61 €	100.254,00 €
			01-12-21	Verankerung Konsolgerüst	1.400,00	m	66,05 €	92.469,11 €
				<b>Vorschubrüstung</b>				
		Unterbau	01-12-22	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	373,55 €	0,00 €
01-12-23	Arbeitsgerüst Widerlager			m²	139,31 €	0,00 €		
Überbau	01-12-24	Vorschubgerüst nach statischen, konstruktiven und sicherheitstechnischen Erfordernissen liefern, herstellen, vorhalten, unterhalten, umsetzen, abbauen und abfahren.		m²	315,93 €	0,00 €		
Kappen	01-12-25	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	292,96 €	0,00 €		
	01-12-26	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	71,61 €	0,00 €		
	01-12-27	Verankerung Konsolgerüst		m	66,05 €	0,00 €		
	<b>Freivorbau</b>							
Unterbau	01-12-22	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	-	0,00 €		
	01-12-23	Arbeitsgerüst Widerlager		m²	-	0,00 €		
Überbau	01-12-24	Gerüst für Freivorbau nach statischen, konstruktiven und sicherheitstechnischen Erfordernissen liefern, herstellen, vorhalten, erhalten, umsetzen, abbauen und abfahren.		m²	-	0,00 €		
Kappen	01-12-25	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	-	0,00 €		
	01-12-26	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	-	0,00 €		
	01-12-27	Verankerung Konsolgerüst		m	-	0,00 €		

Abbildung 7-26: Standardraum Traggerüste



## Kapitel 7 Beispiel zur Anwendung des Modells

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname				
111								336.672,99 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Entwässerung Widerlager</b>				<b>13.225,19 €</b>
		Entwässerung Widerlager	01-13-01	Grundrohr DN150, inkl. Austrittsrohre Edelstahl DN150	72,20	m	36,91 €	2.664,78 €
			01-13-02	Auflagerbankentwässerung Rinne DN100, inkl. Austrittsrohre Edelstahl DN100 (gilt auch für Wartungsgangentwässerung)	72,20	m	70,49 €	5.089,16 €
			01-13-03	Dränschicht Was 7	577,60	m²	9,47 €	5.471,24 €
				<b>Entwässerung Pfeiler</b>				<b>6.947,51 €</b>
		Entwässerung Pfeiler	01-13-04	Pfeilerkopftentwässerung Rinne DN100, inkl. Edelstahlrohr DNN100 als Anschluss zur Sammelleitung	50,00	m	131,57 €	6.578,51 €
			01-13-05	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN150 / Fallrohr	2,00	Stk	184,50 €	369,01 €
			01-13-06	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN200 / Fallrohr		Stk	307,38 €	0,00 €
			01-13-07	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN250 / Fallrohr		Stk	430,43 €	0,00 €
			01-13-08	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN300 / Fallrohr		Stk	875,52 €	0,00 €
			01-13-09	Fallrohr, aus nichtrostendem Stahl, DN300		m	570,87 €	0,00 €
			01-13-10	Energievermichtungsschacht 1,50x1,50m, Stahlbetonfertigteile C35/45, inkl. Schachtabdeckung		Stk	5.527,08 €	0,00 €
				<b>Entwässerung Überbau</b>				<b>316.500,29 €</b>
		Entwässerung Überbau	01-13-11	Tropfützen, inkl. Lochblech und Sickerschicht, gem. RIZ-ING Was11	64,00	Stk	128,35 €	8.214,14 €
			01-13-12	Brückenablauf 300x500, Abgang DN150, Schlammweimer aus Stahlblech, feuerverzinkt, gem. RIZ-ING Was1	64,00	Stk	488,67 €	31.274,88 €
			01-13-13	Anschlussleitung von Brückenablauf an Sammelleitung, einschl. Formstücken, muffenlos, einschl. Anschlüsse u. Befestigungen, DN 150, Rohr aus glasverstärktem Kunststoff (GFK)	512,00	m	172,97 €	88.562,15 €
			01-13-14	Rohrleitung für BW Entwässerung DN 200 Sammelleitung	710,00	m	231,37 €	164.269,97 €
			01-13-15	Rohrdurchführung DN 150	64,00	Stk	257,81 €	16.499,84 €
			01-13-16	Entwässerungs- und Belüftungsöffnungen Hohlkasten in Boden, DN150 mit Vogelschutzgitter, RIZ-ING Was17	32,00	Stk	57,42 €	1.837,55 €
			01-13-17	Entwässerungs- und Belüftungsöffnungen Hohlkasten in Steg, DN150 mit Vogelschutzgitter, RIZ-ING Was17	96,00	Stk	60,85 €	5.841,75 €

**Abbildung 7-27: Standardraum Entwässerung**

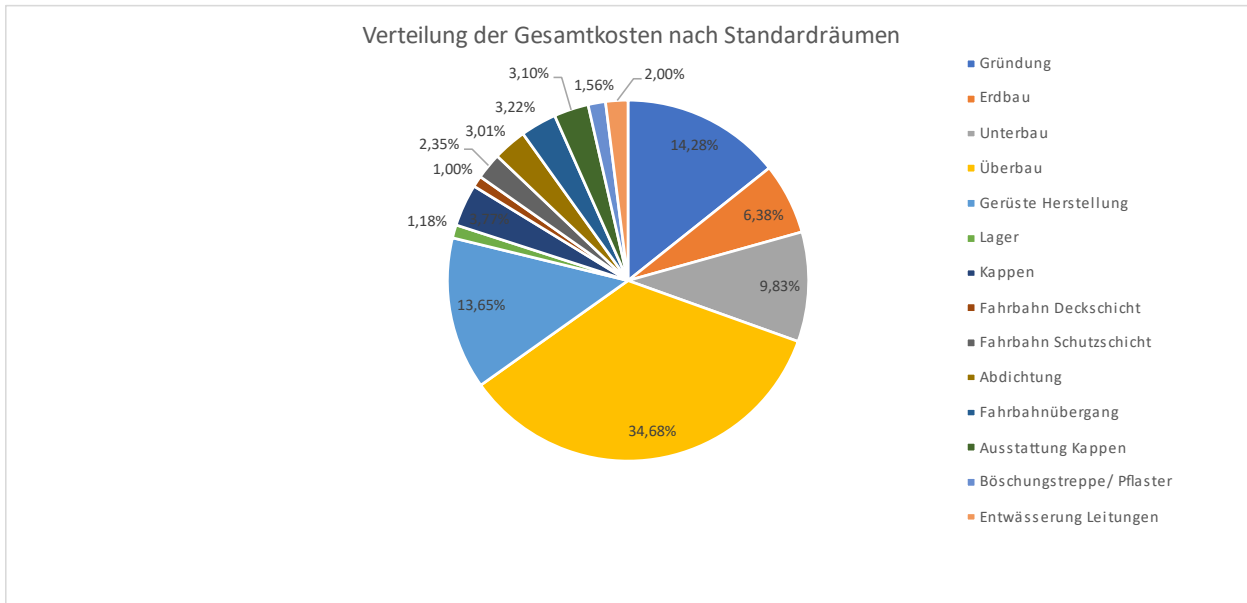
## 7.5.2 Herstellungskosten nach Standardräumen

In Abbildung 7-28 sind die Herstellungskosten gegliedert nach den einzelnen Standardräumen sowie deren Anteil an den Gesamtkosten aufgelistet.

Baugruppe	Standardraumstruktur	Herstellungskosten	Anteil SRS an Gesamtkosten
Baukonstruktion	Gründung	2.408.665,08 €	14,28%
	Erdbau	1.075.687,09 €	6,38%
	Unterbau	1.653.862,36 €	9,81%
	Überbau	5.851.273,59 €	34,69%
	Gerüste Herstellung	2.303.015,87 €	13,65%
Ausstattung	Lager	198.516,34 €	1,18%
	Kappen	636.678,46 €	3,77%
	Fahrbahn Deckschicht	169.191,38 €	1,00%
	Fahrbahn Schutzschicht	396.989,22 €	2,35%
	Abdichtung	507.635,55 €	3,01%
	Fahrbahnübergang	543.841,51 €	3,22%
	Ausstattung Kappen Böschungstreppe/ Pflaster	523.008,03 €	3,10%
		262.468,60 €	1,56%
Technische Anlagen	Entwässerung Leitungen	336.672,99 €	2,00%
<b>GESAMTKOSTEN</b>		16.867.506,07 €	100,00%
inkl. 10% Baustelleneinrichtung		18.554.256,68 €	

Abbildung 7-28: Herstellungskosten nach Standardräumen

Für die 350 m lange Brücke ergeben sich Herstellungskosten von ca. 18,6 Mio. € inkl. eines Aufschlags von 10 % für die Baustelleneinrichtung. In Abhängigkeit der Brückenlänge von 350 m sind ca. 48.000 € zu investieren. Da es sich um zwei Überbauten und somit theoretisch um zwei Bauwerke handelt, ist es aussagekräftiger die Gesamtkosten auf die Brückenfläche von 12.635 m zu beziehen. Daraus ergeben sich Kosten in Höhe von ca. 1.500 €/m<sup>2</sup>. Die Herstellungskosten prozentual verteilt auf die Standardräume sind Abbildung 7-29 dargestellt.



**Abbildung 7-29: Verteilung der Gesamtkosten nach Standardräumen**

Die Gründung der Brücke macht ca. 14 % der Gesamtkosten aus. Dieser hohe Anteil ergibt sich durch die erforderliche Tiefgründung der Brücke. Der Überbau hat mit ca. 35 % den höchsten Anteil an den Gesamtkosten. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass das Beispielobjekt aus zwei getrennten Überbauten besteht. Die Kosten für das Bauverfahren (Taktschiebeverfahren) betragen ca. 14 %. Allerdings ist hier zu beachten, dass die Kosten für die Bauverfahren aufgrund einer Vielzahl an projektspezifischen Einflussfaktoren, mit Vorsicht zu genießen sind. Durch die Standardraumstrukturen wird versucht, diese Einflussfaktoren so gut wie möglich zu berücksichtigen.

Betrachtet man die Verteilung der Gesamtkosten auf die einzelnen Baugruppen ist deutlich zu erkennen, dass bei den Herstellungskosten die Baugruppe Baukonstruktion mit fast 80 % den größten Anteil hat (vgl. Abbildung 7-30).

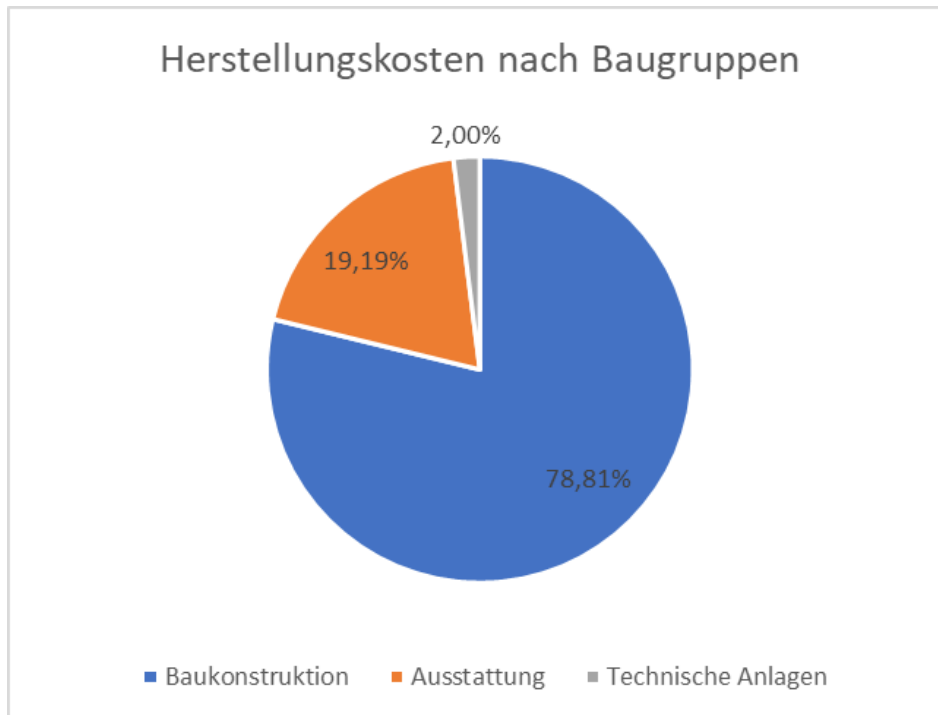


Abbildung 7-30: Anteil der Baugruppen an den Gesamtkosten

### 7.5.3 Instandsetzungskosten nach Positionen

Zur Berechnung der Instandsetzungskosten werden die Standardräume, welche die nach Kapitel 5.1.2 für die Instandsetzung relevanten Bauteile enthalten, mit den Positionen aus Kapitel 7.5.1 verwendet. Zusätzlich zu den Kosten für den Einbau der Bauteile werden Kosten für den Abbruch und den Ausbau sowie für die benötigten Traggerüste angesetzt. Hierfür wurde ein separater Standardraum erstellt, der sämtliche Positionen für den Ausbau bzw. den Abbruch von Bauteilen wie bspw. für Lager, Fahrbahnübergänge und Kappen enthält (vgl. Kapitel 5.2.3.14). Abbildung 7-31 zeigt den Standardraum mit den enthaltenen Positionen.

## Kapitel 7 Beispiel zur Anwendung des Modells

LB	Funktionseinheit	Unterfunktions-einheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					
124								3.015.752,82 €	
116					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Betoninstandsetzung</b>				1.242.777,32 €	
124	Beton Instandsetzung	Beton-instandsetzung	01-14-01	Beton flächig abtragen. Beton druckwasserstrahlen	4.268,83	m²	80,95 €	345.562,06 €	
			01-14-02	Beton vorbereiten für Teilersatz mittels Druckluft mit festen Starhmitteln strahlen	4.268,83	m²	7,90 €	33.729,88 €	
			01-14-03	Haftbrücke auf vorbereiteter Betonunterlage aus Zementmörtel	4.268,83	m²	6,88 €	29.355,34 €	
			01-14-04	Instandsetzung mit PCC (kunststoffmodifizierter Zementmörtel) herstellen. Einbaudicke 2-6 cm	4.268,83	m²	195,40 €	834.130,03 €	
						<b>Betonstahl</b>			1.863,26 €
		Betonstahl	01-14-05	Betonstahl vorbereiten DN 12 bis 16 mm	100,00	m	5,42 €	541,75 €	
			01-14-06	Beschichtung Betonstahl Zementleim mit Kunststoffzusatz und zusätzlichem Korrosionsschutz	100,00	m	13,22 €		1.321,51 €
						<b>Risse</b>			4.399,30 €
		Risse	01-14-07	Risse vorbereiten für Epoxidharz	100,00	m	5,55 €	554,90 €	
			01-14-08	Tränkung der Risse mit Epoxidharz	100,00	m	9,45 €	944,95 €	
			01-14-09	Epoxidharz liefern	100,00	m	18,91 €	1.890,96 €	
			01-14-10	Risse nachbehandeln durch Abschleifen	100,00	m	10,08 €	1.008,48 €	
						<b>Lager</b>			85.608,24 €
		Lager	01-14-11	Lager ausbauen	37,00	Stk	2.115,64 €	78.278,68 €	
01-14-12	Überbau anheben und absenken. Pressenansatz auf Auflagerbank.		1,00	psch	7.329,56 €	7.329,56 €			
				<b>Kappen</b>			137.888,68 €		
Kappen	01-14-13	Kappen abbrechen	735,00	m³	187,60 €	137.888,68 €			
				<b>Fahrbahn/ Abdichtung</b>			717.488,17 €		
Fahrbahn/ Abdichtung	01-14-14	Abdichtung abbrechen	12.635,00	m²	10,51 €	132.833,50 €			
	01-14-15	Asphaltoberbau trennen	700,00	m	7,19 €	5.034,83 €			
	01-14-16	Deck- und Zwischenschicht abtragen	10.010,00	m	4,86 €	48.627,38 €			
	01-14-17	Asphalt fräsen	10.010,00	m²	11,63 €	116.376,26 €			
	01-14-18	Gebundenen Oberbau aufbrechen	10.010,00	m²	41,42 €	414.616,20 €			
				<b>Fahrbahnübergang</b>			9.024,40 €		
Fahrbahnübergang	01-14-19	Fahrbahnübergang ausbauen	4,00	Stck	2.256,10 €	9.024,40 €			
				<b>Ausstattung Kappen</b>			17.122,77 €		
Ausstattung Kappen	01-14-20	Geländer ausbauen	700,00	m	4,89 €	3.424,53 €			
	01-14-21	Bordsteine ausbauen	700,00	m	17,18 €	12.026,00 €			
	01-14-22	SE abbauen	700,00	m	2,20 €	1.540,00 €			
	01-14-23	AEK abbauen	2,00	st	11,91 €	23,82 €			
	01-14-24	Übergangskonstruktion für Schutzeinrichtung aus E	4,00	St	33,06 €	132,24 €			
				<b>Entwässerung</b>			32.454,53 €		
Entwässerung	01-14-25	Brückenablauf ausbauen	64,00	Stk	196,01 €	12.544,64 €			
	01-14-26	Entwässerungsleitung ausbauen	710,00	m	21,05 €	14.947,87 €			
	01-14-27	Tropftülle ausbauen	64,00	Stk	77,53 €	4.962,03 €			
				<b>Instandsetzung</b>			767.126,15 €		
116	Traggerüste	Instandsetzung	01-14-28	Trag- Arbeits und Schutzgerüst Kappen	700,00	m	555,84 €	389.085,63 €	
			01-14-29	Trag- Arbeits und Schutzgerüst Brückenunterseite	700,00	m	408,12 €	285.682,36 €	
			01-14-30	Verankerung für Gesimskonsolen für Kappenschal	1.400,00	m	65,97 €	92.358,15 €	

Abbildung 7-31: Standardraum Abbruch und Instandsetzung

### 7.5.4 Instandsetzungskosten nach Standardräumen

Für die in Kapitel 7.1 unterschiedlichen vorgestellten Varianten werden im Folgenden die Instandsetzungskosten in Abhängigkeit der Objekteigenschaften für eine Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren bestimmt. Die Kosten für den Ausbau und den Abbruch der Bauteile werden direkt den jeweiligen Standardräumen zugeordnet, um die Gesamtkosten für Einbau und Ausbau in Summe darzustellen. Auf der Grundlage der relativen Anteile der Standardräume an den Gesamtkosten werden wesentliche Kostentreiber identifiziert. Neben dem Verlauf der Instandsetzungskosten über den Lebenszyklus werden auch die Kosten zeitpunktbezogen analysiert. Eine Preissteigerungsrate wird dabei vernachlässigt.

In Abbildung 7-32 bis Abbildung 7-34 sind die Instandsetzungszeitpunkte der verschiedenen Strategien dargestellt.

Jahr	Bauteil				
17	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung		
22	FÜ				
26	Kappe	SE			
31	Lager				
32	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	
44	FÜ				
49	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Kappe	SE
62	Deckschicht	EW	FÜ	Lager	
66	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Überbau	
75	Kappe	SE			
83	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	FÜ	
92	Deckschicht	EW	Lager		

Abbildung 7-32: Instandsetzungszeitpunkte – reaktive Strategie

Jahr	Bauteil							
10	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung					
13	FÜ	Kappen	SE					
20	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Lager			
26	Kappe	SE	FÜ					
30	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Überbau				
40	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Lager	Kappe	SE	FÜ
50	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Kappe	SE	FÜ		
60	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Lager	Überbau		
63	FÜ	Kappen	SE					
70	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung					
76	FÜ	Kappen	SE					
80	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Lager			
90	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Kappe	SE	FÜ	Überbau	

Abbildung 7-33: Instandsetzungszeitpunkte - Mischstrategie

Jahr	Bauteil						
8	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung				
10	FÜ						
12	Kappen	Schutzeinrichtungen					
16	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW			
17	Lager						
20	FÜ						
24	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Kappen	SE		
30	FÜ						
32	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Überbau		
34	Lager						
36	Kappen	SE					
40	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	FÜ			
48	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Kappen	SE	
50	FÜ						
51	Lager						
56	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung				
60	FÜ	Kappen	SE				
64	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Überbau		
68	Lager						
70	FÜ						
72	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	Kappen	SE		
80	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	FÜ		
84	Kappen	SE					
85	Lager						
88	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung				
90	FÜ						
96	Deckschicht	Schutzschicht	Abdichtung	EW	Kappen	SE	Überbau

Abbildung 7-34: Instandsetzungszeitpunkte – aktive Strategie

Der Verlauf der kumulierten Instandsetzungskosten über einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ist für die drei verschiedenen Instandhaltungsstrategien in Abbildung 7-35 dargestellt:

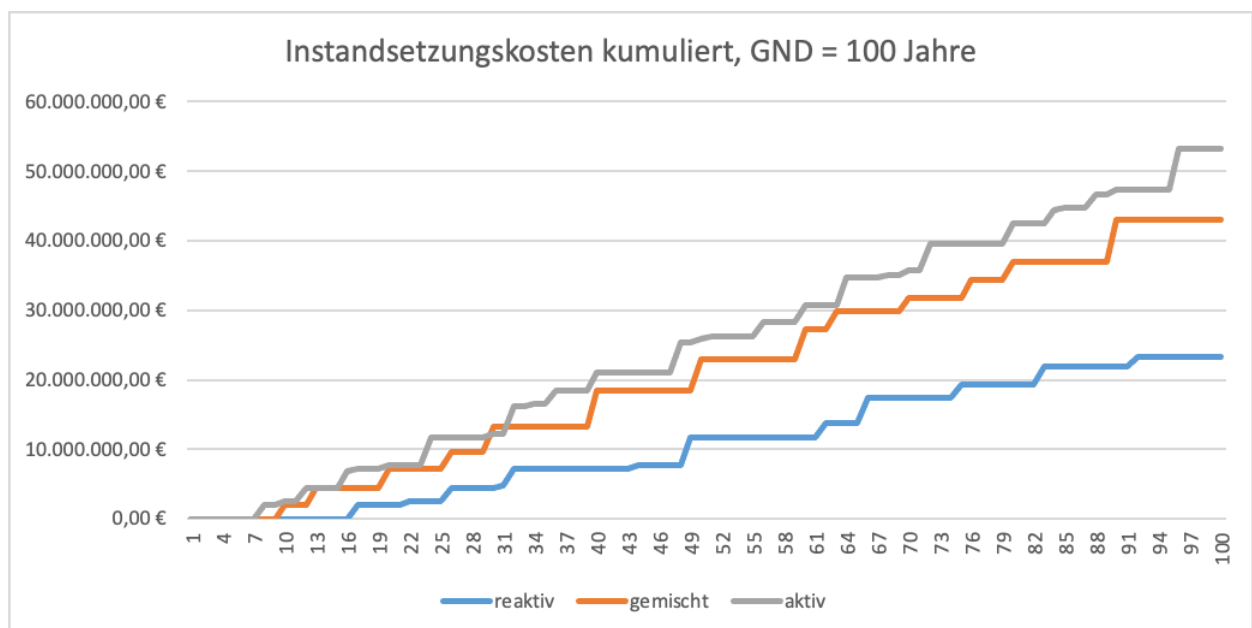


Abbildung 7-35: Instandsetzungskosten kumuliert für die angenommene GND von 100 Jahren

Für die reaktive Strategie sind über den Betrachtungszeitraum von 100 Jahren ca. 24,4 Mio. € zu investieren. Für die Instandsetzungskosten wurden ebenfalls für jede Maßnahme 10 % für die Kosten der Baustelleneinrichtung addiert. Damit betragen die kumulierten Instandsetzungskosten am Ende des Betrachtungszeitraumes 132 % der Herstellungskosten. Für die gemischte Strategie sind insgesamt ca. 43 Mio. € zu investieren und damit ca. 85 % mehr als für die reaktive Strategie. Die aktive Strategie erfordert Investitionen in Höhe von ca. 53,2 Mio. €. Das sind 128 % mehr als für die reaktive Strategie und 19 % mehr als für die Mischstrategie. Der deutlich geringere Unterschied zwischen der aktiven Strategie und der Mischstrategie liegt an der hohen Kritikalität der Brücke. Dadurch ist den meisten Funktionseinheiten eine zustandsorientierte oder eine vorausbestimmte Strategie zugeordnet. Daher ist der Unterschied zwischen reaktiver Strategie und der Mischstrategie deutlich größer als zwischen der Mischstrategie und der aktiven Strategie.

Bei Anwendung der reaktiven Strategie besteht ein erhöhtes Risiko von ungeplanten Sperrungen aufgrund von plötzlich auftretenden Schäden an den Objekten. Prominente Beispiele aus Deutschland für dieses Szenario sind die Rheinbrücke in Leverkusen (BAB 1), die Brücke Rahmede im Zuge der A45 bei Lüdenscheid (BAB 45) sowie die Salzbachtalbrücke in Wiesbaden (BAB 66).<sup>480</sup> Die Gefahr, dass Brücken nicht mehr oder nur unter starken Einschränkungen zur Verfügung stehen, ist bei Anwendung der reaktiven Strategie dementsprechend groß und damit auch der volkswirtschaftliche Schaden. Dieser ist bei den Berechnungen der zukünftigen Investitionskosten zu berücksichtigen und bei Brücken mit hoher Kritikalität, über die viel Verkehr abgewickelt wird, größer als bei Brücken, welche eine geringe Kritikalität besitzen. Daher ist die monetäre Vorteilhaftigkeit der reaktiven Strategie zu hinterfragen, da bei dieser Strategie die Kosten für den volkswirtschaftlichen Schaden zu den hier berechneten Kosten addiert werden müssen. Die hier untersuchte Brücke weist wie bereits erwähnt eine hohe Kritikalität auf, weshalb bei einer gesamtwirtschaftlichen Betrachtung die Kosten dieser Strategie nicht auf dem hier berechneten Niveau verharren werden. Daher ist die Budgetplanung mit den Kosten der Mischstrategie vorzunehmen.

Betrachtet man die Verteilung der Kosten nach Standardräumen (vgl. Abbildung 7-36), ist deutlich zu erkennen, dass sich die Kostenanteile im Gegensatz zu den Herstellungskosten verschoben haben. Die Standardräume der Baugruppe Baukonstruktion haben keinen Anteil an den Instandsetzungskosten, da diesen Bauteilen eine unendliche Lebensdauer zugeordnet wurde. Den größten Anteil an den Instandsetzungskosten bei der reaktiven Strategie hat die Deckschicht mit 23 %. Aufgrund der geringen Lebensdauer sowie der Abhängigkeiten zu verschiedenen Bauteilen ergeben sich für dieses Bauteil insgesamt sieben Instandsetzungszeitpunkte. Die Abdichtung hat einen Anteil von 15 % und die Schutzschicht von 11 %. Damit macht der Belag bei dieser Strategie einer Brücke fast die Hälfte der Instandsetzungskosten aus.

Für die anderen Strategien ergibt sich ein ähnliches Bild. Mit 16 % hat die Deckschicht bei der Mischstrategie einen geringeren Anteil an den Gesamtkosten. Erhöht hat sich dagegen der Anteil der Kappen, Schutzeinrichtungen sowie des Überbaus. Grund hierfür ist die Zuordnung der vorausbestimmten Strategie zu den Funktionseinheiten Kappen und Überbau. Da die Schutzeinrichtungen eine Instandsetzungsgruppe mit den Kappen bilden, werden diese

---

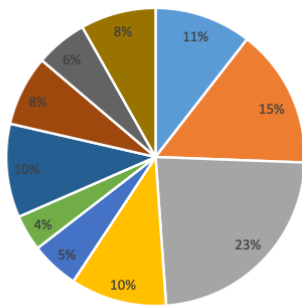
<sup>480</sup> Vgl. Gerald Traufetter: Deutschlands Brücken sind noch maroder als befürchtet. Internetquelle,



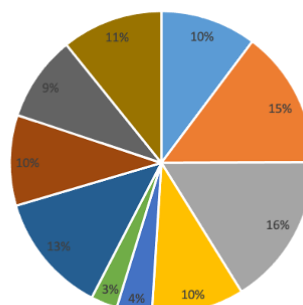
zwangsläufig auch nach dieser Strategie instandgesetzt. Die Anteile der Standardräume bei der aktiven Strategie fallen annähernd gleich aus.

**Anteil der Standardräume an den Gesamtkosten, GND = 100 Jahr**

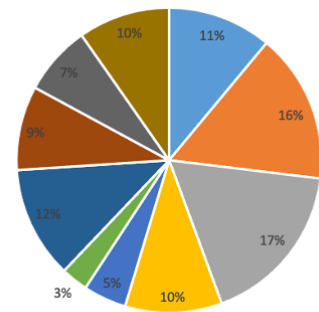
**Reaktive Strategie**



**Mischstrategie**



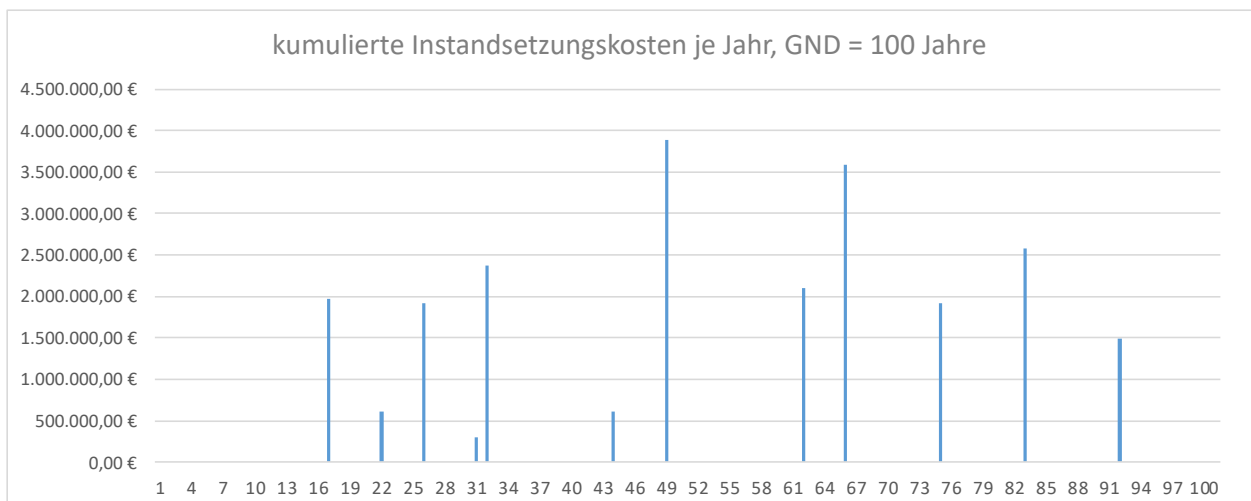
**Aktive Strategie**



- Schutzschicht
- Abdichtung
- Deckschicht
- Fahrbahnübergang
- Entwässerung
- Lager
- Kappen
- Schutzeinrichtung, Geländer
- Überbau
- Gerüste

**Abbildung 7-36: Anteil der Standardräume an den Gesamtkosten für die verschiedenen Strategien für die angenommene GND von 100 Jahren**

Abbildung 7-37 bis Abbildung 7-39 zeigen die kumulierten Instandsetzungskosten pro Jahr für die verschiedenen Strategien.



**Abbildung 7-37: kumulierte Instandsetzungskosten je Jahr für die angenommene GND von 100 Jahren, reaktive Strategie**

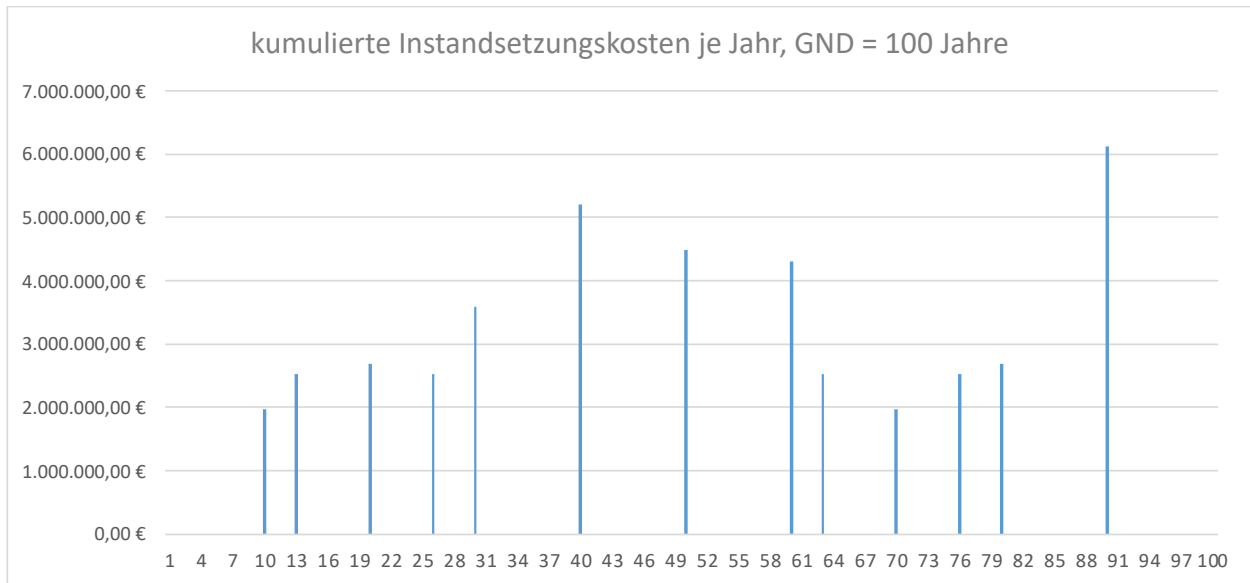


Abbildung 7-38: kumulierte Instandsetzungskosten je Jahr für die angenommene GND von 100 Jahren, Mischstrategie

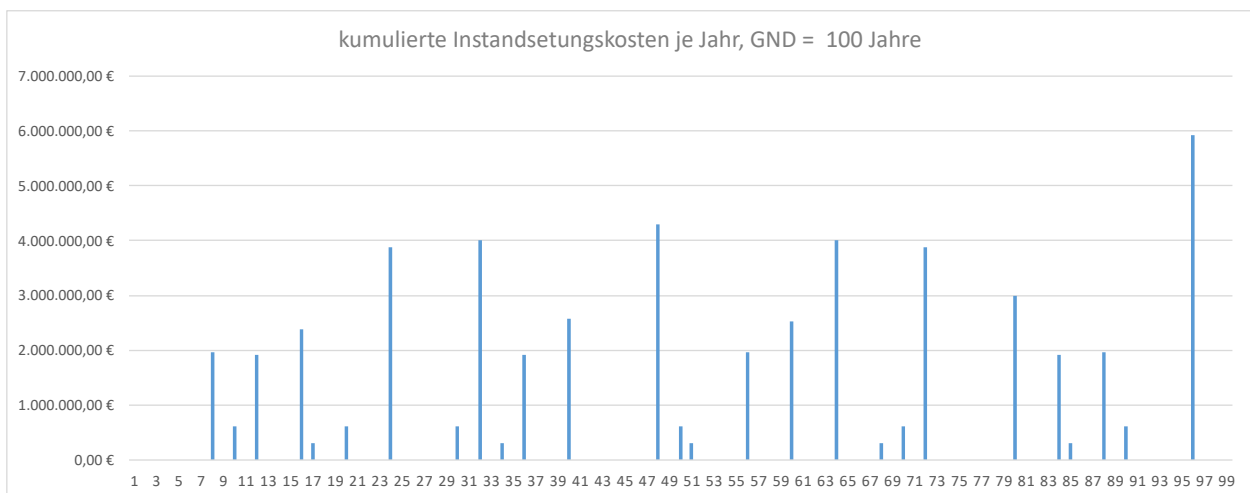
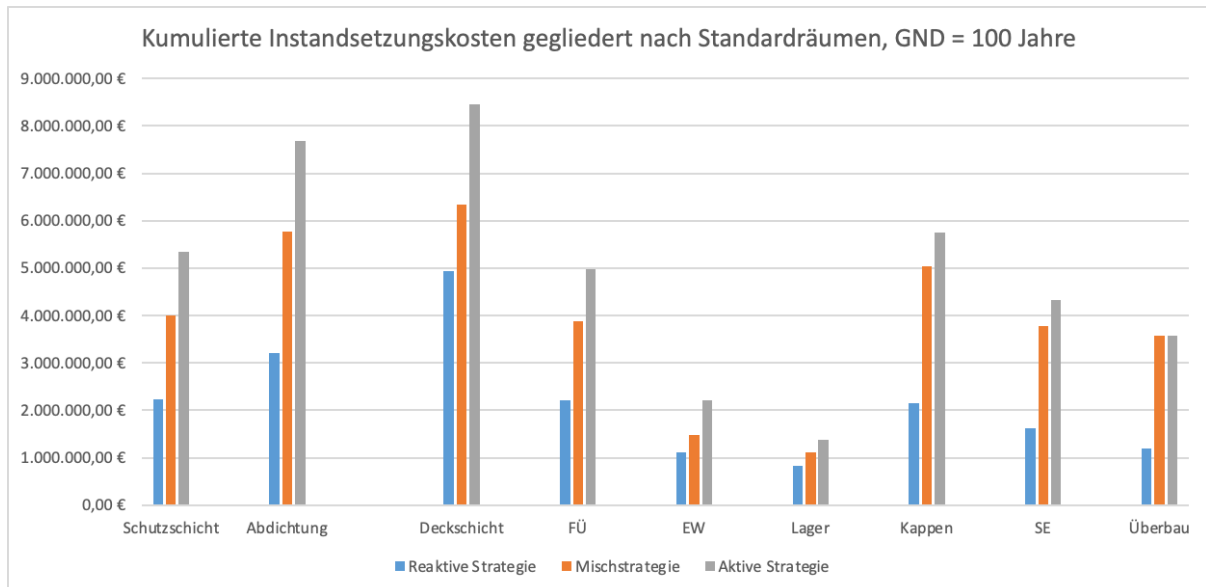


Abbildung 7-39: kumulierte Instandsetzungskosten je Jahr für die angenommene GND von 100 Jahren, aktive Strategie

Insgesamt sind bei der reaktiven Strategie 12 Instandsetzungszeitpunkte notwendig, so dass die Brücke im Schnitt alle 8,3 Jahre für Instandsetzungsarbeiten gesperrt werden muss. Die gemischte Strategie muss bei 13 Instandsetzungen nur einmal mehr gesperrt werden als bei der reaktiven Strategie. Dagegen stehen insgesamt 27 Instandsetzungen bei der aktiven Instandhaltung.

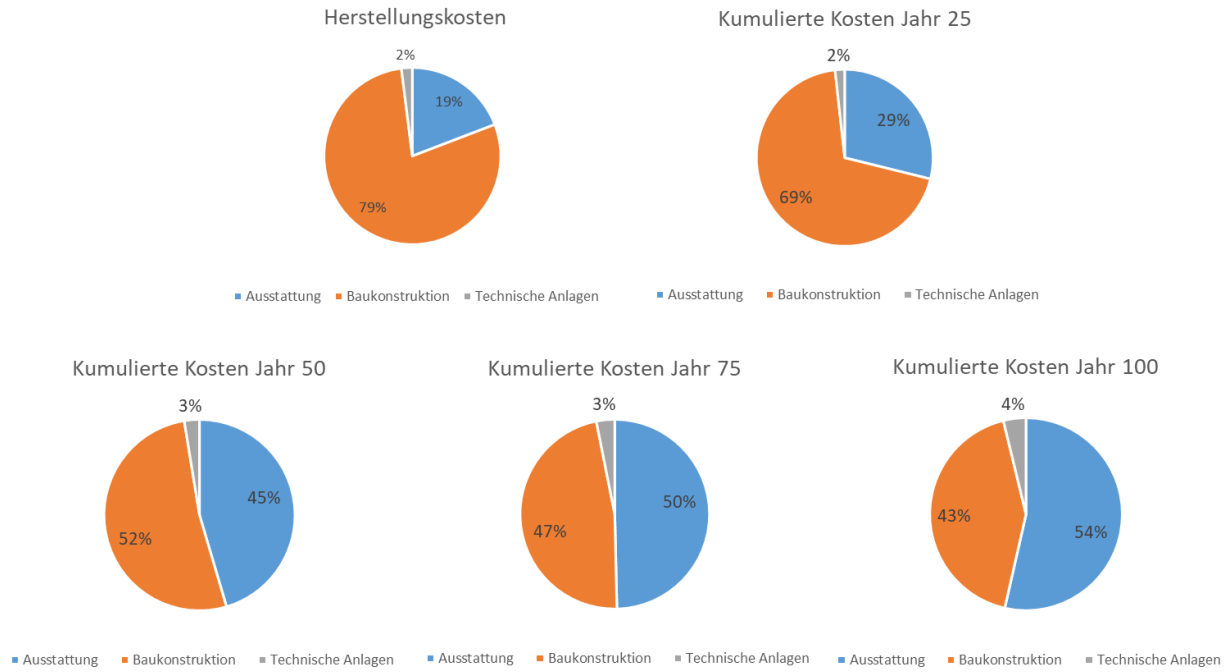
Die kumulierten Instandsetzungskosten für den Betrachtungszeitraum gegliedert nach Standardräumen sind in Abbildung 7-40 dargestellt. Die Abbildung zeigt, dass bei einer reinen reaktiven Instandhaltung für die Deckschicht mit 4,9 Mio. € die größten Investitionen zu tätigen sind, gefolgt von der Abdichtung mit 3,2 Mio. Für die Schutzschicht, Fahrbahnübergänge und Kappen sind jeweils ca. 2,2 Mio. € zu investieren. Bei den anderen Instandhaltungsstrategien fallen ebenfalls für die Deckschicht die höchsten Kosten an. Bei der aktiven Instandhaltung sind

für die Deckschicht knapp 8,5 Mio. € aufzuwenden gefolgt von der Abdichtung mit ca. 7,7 Mio. €. Die geringsten Kosten verursachen bei allen drei Strategien die Lager.

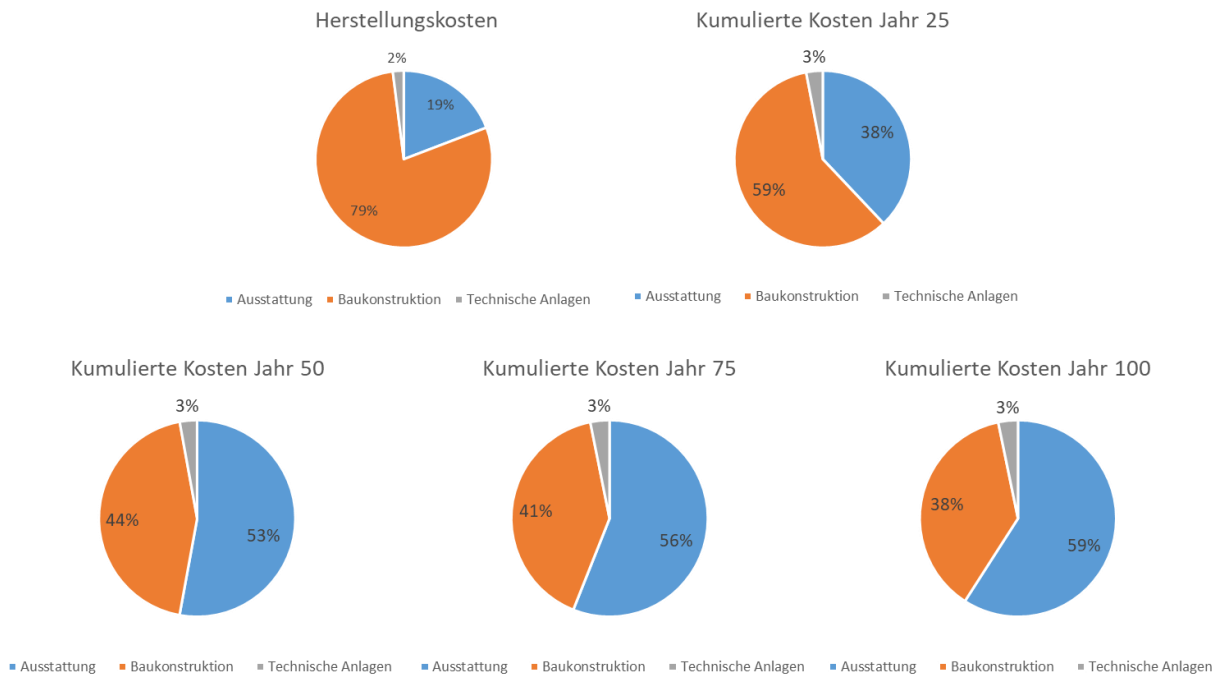


**Abbildung 7-40: kumulierte Instandsetzungskosten gegliedert nach Standardräumen für die angenommene GND von 100 Jahren**

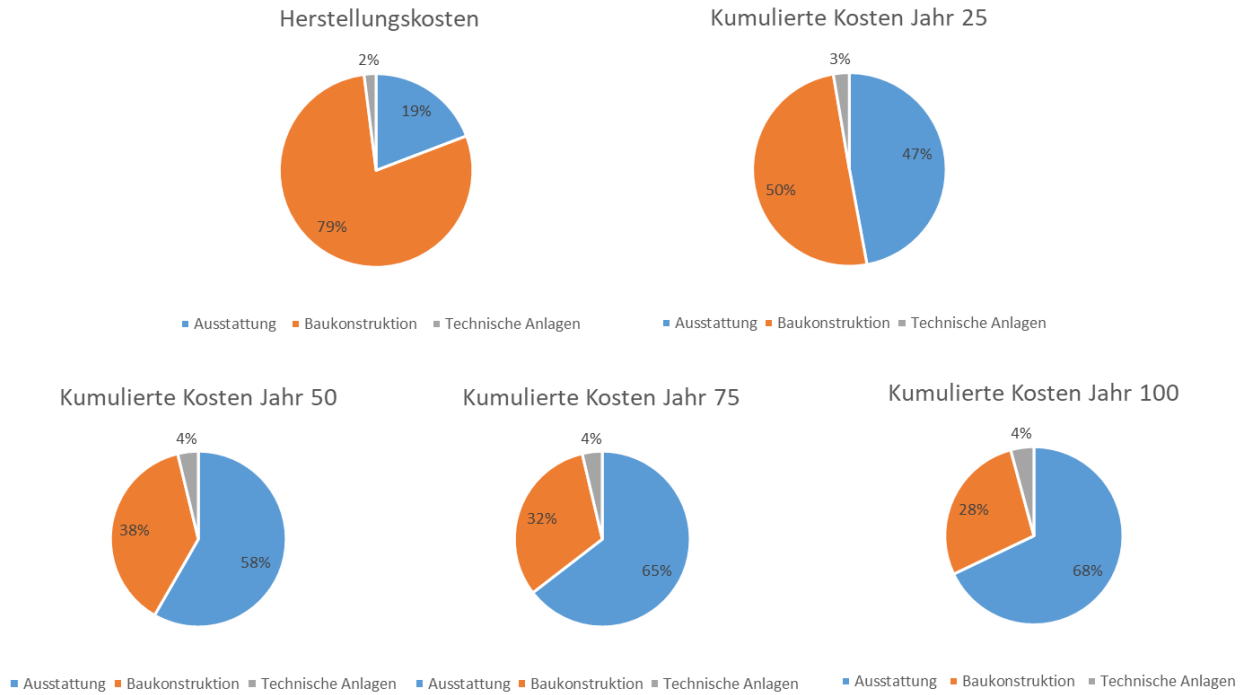
Aus wirtschaftlichen Gründen wie bspw. erhöhte Verkehrslasten, Erhöhung der Anzahl der Fahrspuren, Nutzungsänderungen etc. können sich kürzere Gesamtnutzungsdauern ergeben. Mit dem Modell ist es möglich, die Instandsetzungskosten für verschiedene Gesamtnutzungsdauern zu berechnen. In Abbildung 7-41 bis Abbildung 7-43 sind die kumulierten Kosten (Herstellung + Instandsetzung) für verschiedene Gesamtnutzungsdauern prozentual für die verschiedenen Varianten dargestellt. Für die verschiedenen Gesamtnutzungsdauern des Bauwerks verändert sich das Verhältnis der Gesamtkosten (Herstellungskosten und zukünftige Investitionskosten) zwischen den Baugruppen der Baukonstruktion, Ausstattung und Technischen Anlagen. Während bei den Herstellungskosten die Baugruppe Baukonstruktion noch fast 80 % der Kosten ausmacht, beträgt der Anteil dieser Baugruppe an den Gesamtkosten nach einer Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren nur noch 43 % und damit weniger als die Hälfte. Mit einem Anteil von 54 % ist nach 100 Jahren für die Baugruppe Ausstattung am meisten zu investieren. Für die aktive Strategie hat nach 100 Jahren die Baugruppe Baukonstruktion nur noch einen Anteil von 28 %. Über die Gesamtnutzungsdauer werden bei dieser Strategie die Bauteile der Ausstattung häufiger instandgesetzt, was zu einem höheren Anteil an den Gesamtkosten führt.



**Abbildung 7-41: Kumulierte Kostenentwicklung prozentual über verschiedene Gesamtnutzungsdauern – reaktive Strategie**



**Abbildung 7-42: Kumulierte Kostenentwicklung prozentual über verschiedene Gesamtnutzungsdauern – Mischstrategie**



**Abbildung 7-43: Kumulierte Kostenentwicklung prozentual über verschiedene Gesamtnutzungsdauern – aktive Strategie**

## 7.6 Zusammenfassung

Für eine achtfeldrige Brücke wurden die Investitionskosten über eine Gesamtnutzungsdauer von 100 Jahren bestimmt. Auf Grundlage der Standardraumstruktur ergaben sich Herstellungskosten in Höhe von ca. 18,6 Mio. € bzw. 1.500 €/m<sup>2</sup> bezogen auf die Brückenfläche. Die Instandsetzungskosten wurden für drei verschiedene Varianten von Instandsetzungsstrategien berechnet. Für die reaktive Strategie betragen die Instandsetzungskosten ca. 24,4 Mio. €. Demgegenüber stehen ca. 43 Mio. € für die gemischte Strategie und ca. 53,2 Mio. € für die aktive Strategie. Insgesamt sind über den Betrachtungszeitraum von 100 Jahren je nach gewählter Instandsetzungsstrategie zwischen 43 Mio. € und 71,8 Mio. € zu investieren. Bezieht man die Kosten auf die Brückenfläche ergeben sich 3.400 bis 5.700 €/m<sup>2</sup>.

Während der Überbau mit 35 % wesentlicher Kostentreiber der Herstellungskosten ist, hat der Belag bestehend aus Deckschicht, Schutzschicht und Abdichtung bei allen drei Instandhaltungsstrategien den größten Anteil an den Instandsetzungskosten.

Aus diesen Berechnungen wird deutlich, dass selbst bei Ausnutzung des kompletten Abnutzungsvorrates bis auf 2,5 % unter Anwendung der reaktiven Strategie, die Instandsetzungskosten ca. das 1,3 fache der Herstellungskosten betragen. Diese Zahlen zeigen, dass eine Berechnung der zukünftigen Investitionskosten für eine langfristige Budgetplanung essenziell ist. Bei Anwendung der aktiven Instandsetzungsstrategie betragen die Instandsetzungskosten fast das Vierfache der Herstellungskosten.

Die Berechnungen haben gezeigt, dass sich die Kostenanteile der Standardräume an den Gesamtkosten über die Gesamtnutzungsdauer verschieben. Während bei den Herstellungskosten die Standardräume der Baukonstruktion die wesentlichen Kostentreiber darstellen, haben nach dem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren die Standardräume der Ausstattung den größten Anteil. Je nach angewendeter Instandsetzungsstrategie macht diese Baugruppe am Ende der Gesamtnutzungsdauer bis zu 68 % der gesamten Investitionskosten aus.

## **8 Schlussbemerkungen**

### **8.1 Zusammenfassung**

Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland stellt einen großen Anteil des Anlagevermögens des Bundes. Aufgrund der in Kapitel 2 aufgezeigten Altersstruktur kommt der Instandsetzung immer größere Bedeutung zu.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, eine allgemeine Methodik zur Bestimmung der Investitionskosten von Verkehrswegen, Brücken und Tunneln zu entwickeln, um eine funktionsfähige Verkehrsinfrastruktur zu gewährleisten. Diese Forderung wurde durch die Entwicklung eines Modells mit einer geeigneten Methodik, welches von jeder Organisationseinheit angewendet werden kann, erreicht. Durch das Modell lassen sich die Kosten für unterschiedliche Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung der Objektkonzeption in frühen Projektphasen berechnen.

Als Ausgangsbasis für die Entwicklung einer Methodik zur Erreichung des Forschungsziels wurden zu Beginn die relevanten theoretischen Grundlagen mittels einer umfassenden Literaturrecherche erörtert. Der Begriff der Instandsetzung wurde für diese Arbeit klar abgegrenzt und als Zusammenfassung aller Maßnahmen, die aufgrund des Erreichens der technischen Lebensdauer der Rückführung des Ist-Zustandes einer Betrachtungseinheit in den ursprünglichen Soll-Zustand dienen verstanden. Durch eine Instandsetzung verändert sich der Wert der Betrachtungseinheit und die Lebensdauer des Bauteils beginnt nach der Maßnahme wieder bei null.

In Kapitel 3 wurde der Forschungsbedarf für diese Arbeit abgeleitet. Neben verschiedenen Arbeiten, welche sich mit der Kostenprognose und der Ermittlung von Lebensdauern beschäftigen, fanden sämtliche Normen und Richtlinien Verwendung. Die für diese Arbeit wichtigen Teilbereiche Instandhaltung, Kostenermittlung, Zuverlässigkeitsanalyse und Modellbildung wurden analysiert, um eine Grundlage für die Modellbildung im weiteren Verlauf der Arbeit zu schaffen.

Die im Rahmen der Literaturrecherche aufgeführten Forschungsarbeiten liefern keinen geeigneten Ansatz, um die Kosten in frühen Projektphasen unter Berücksichtigung der Objektkonzeption sowie der Instandhaltungsstrategie zu ermitteln. Die vorliegende Literatur ermittelt die Kosten über prozentuale Ansätze zu den Herstellungskosten ohne Berücksichtigung der Objektkonzeption und bezieht sich auf eine zustandsorientierte Instandsetzung, was eine Anwendung in frühen Projektphasen ausschließt.

Die Herleitung der Methodik zur Erfüllung der Forderung des Forschungsgegenstandes erfolgte in Kapitel 4. Mit ihr ist es möglich, die Kosten bereits in frühen Projektphasen zu bestimmen. Die zukünftigen Investitionskosten ergeben sich als Funktion von Lebensdauern, Kostenkennwerten sowie der Dimensionierung, Ausstattung und Konzeption des Objekts.

Zunächst wurde eine Objektstruktur hergeleitet, die die Objekte in ihre Bauteile gliedert, die für die Kostenberechnung zu berücksichtigen sind. Um die physischen Abhängigkeiten der Bauteile zu berücksichtigen, wurden Instandsetzungsgruppen für eine bauteilorientierte Instandsetzung gebildet.

Für die Ermittlung der Lebensdauer wurde eine Methodik basierend auf der Zuverlässigkeitsanalyse hergeleitet. Die Lebensdauern werden über den Verlauf des Abnutzungsvorrates abgebildet. Dieser entspricht dem Verlauf einer Weibullverteilung. So lässt sich zu jedem Zeitpunkt die Überlebenswahrscheinlichkeit des Bauteils bestimmen.

Die Kostenermittlung erfolgt über das Modell der Standardraumstrukturen, welche für die Bauwerke Straße, Brücke und Tunnel weiterentwickelt wurden. Durch die Anwendung der Standardraumstrukturen wird die Ausführungsplanung zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung vorweggenommen, so dass die Berechnungen bereits mit den planerischen Festsetzungen aus der Vorplanung durchgeführt werden können. Die Standardräume wurden mit ausführungsorientierten Positionen befüllt, denen Kostenkennwerte und Lebensdauern zugeordnet wurden.

Die Kostenkennwerte für das Modell wurden empirisch hergeleitet. Für die Auswertung standen bepreiste Leistungsverzeichnisse sowie Angebots-LVs mit den dazugehörigen Preisspiegeln zur Verfügung. Über Regressionsanalysen können die Kostenkennwerte auf verschiedene Einflussfaktoren untersucht werden.

Als Ergebnis resultieren aus dem Modell die Herstellungskosten sowie zukünftigen Investitionskosten in Abhängigkeit der Objektkonzeption. Das Modell bietet die Möglichkeit, verschiedene Varianten der Bauausführung miteinander zu vergleichen und diese hinsichtlich ihrer Kosten zu bewerten.

Das Modell wurde an einem exemplarisch entworfenen Bauwerk angewendet, um die Belastbarkeit der Anwendung zu untersuchen und die Leistungsfähigkeit darstellbar zu machen. Die Kosten wurden nach Standardräumen und Baugruppen gegliedert und für verschiedene Instandsetzungsstrategien berechnet.

Das entwickelte Modell stellt einen Leitfaden zur Bestimmung der Investitionskosten dar und schafft eine Grundlage für eine angemessene Budgetplanung für die Instandsetzungen sowie den Neubau von Verkehrsinfrastrukturbauwerken. Das Modell wurde für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur entwickelt ist aber bei Kenntnis der notwendigen Informationen auch für andere Bereiche anwendbar.

## **8.2 Ausblick und Empfehlungen für weitere Untersuchungen**

Das Modell zur Bestimmung der Herstellungskosten sowie zukünftigen Investitionskosten benötigt verschiedene Eingangsparameter, wie Kostenkennwerte und Lebensdauern und gibt ein konsistentes Vorgehen vor, ist aber dennoch so flexibel konzipiert, dass Änderungen und Ergänzungen der Eingangsgrößen vorgenommen werden können.



Kostenkennwerte unterliegen im Laufe der Zeit Schwankungen, weshalb diese fortlaufend aktualisiert werden müssen. Die erstellte Datenbank sollte um weitere Werte ergänzt werden, um die Analysen mit einer größeren Datenbasis durchzuführen. So können für die Kostenkennwerte verschiedene Projekteigenschaften berücksichtigt werden und die Ergebnisse in das Modell implementiert werden, um die Belastbarkeit der implementierten Daten zu erhöhen. Für die Erstellung des Modells wurden die aktuell gültigen Regelwerke, Richtlinien und Normen herangezogen, um das Bauwerk als Standardraumstruktur darzustellen. Diese müssen für die Anwendung des Modells stets überprüft werden und gegebenenfalls Änderungen in das Modell implementiert werden. Dies gilt vor allem für die technischen Anlagen im Tunnelbau, da hier mit einer stetigen Weiterentwicklung der Technologien zu rechnen ist. Als Eingabeparameter für die Berechnung der zukünftigen Investitionskosten sind Lebensdauern für die einzelnen Bauteile notwendig. Für die Berechnung der Lebensdauern wurde ein theoretisches Vorgehen entwickelt, für welches eine Datensammlung nach den in dieser Arbeit vorgestellten Regeln aufzustellen ist. Hierfür sind in weiteren Arbeiten empirische Erhebungen von entsprechenden Daten durchzuführen. Mit Hilfe der Datensammlung und des vorgegebenen Verfahrens können dann belastbare technische Lebensdauern bestimmt werden, welche als Eingabeparameter für das Modell dienen. Anhand dieser Daten können Festlegungen innerhalb des Modells plausibilisiert werden.

Ein weiterer Punkt, welcher bei der Berechnung der Instandsetzungskosten zu berücksichtigen ist, sind die volkswirtschaftlichen Aspekte, um eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung zu ermöglichen. Hierfür könnten in folgenden Arbeiten Verfahren entwickelt werden, die bspw. Sperrungen von Streckenabschnitten und deren Auswirkungen auf die Volkswirtschaft monetär bewerten. Zusammen mit den Kostenberechnungen nach dem Modell dieser Arbeit kann so eine gesamtwirtschaftliche Bewertung von Instandsetzungsmaßnahmen erfolgen.

**Glossar**

Abnutzungsvorrat	Potential, welches einer Betrachtungseinheit innewohnt. Dieser wird zur Erfüllung seiner Funktion verwendet und gewährleistet diese unter festgelegten Bedingungen bezüglich der beabsichtigten Nutzungsart und Nutzungsintensität. Unterschreitet das Potential einen gewissen Wert, kann die Funktionalität nicht mehr weiter aufrechterhalten werden. <sup>481</sup>
Abnutzungsgrenze	Die Abnutzungsgrenze stellt jenen Wert dar, ab dem die Einheit ihre Funktion nicht mehr erfüllen kann und ein Eingreifen in Form einer Instandhaltungsmaßnahme notwendig wird. <sup>482</sup>
Austauschrate	Die Austauschrate gibt an, wie oft ein Bauteil während eines betrachteten Zeitraums aufgrund seiner Lebensdauer ausgetauscht werden muss.
Bauteil	Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Betriebsmittel oder System, das/die für sich allein beschrieben und betrachtet werden kann. <sup>483</sup>
Bauteilgruppe	Die ASB-Ing unterteilt ein Bauwerk in folgende Bauteilgruppen: Überbau, Unterbau, Bauwerk, Vorspannung, Gründungen, Erd- und Felsanker, Brückenseile- und Kabel, Lager, Fahrbahnübergänge, Abdichtungen, Beläge, Kappen, Schutzeinrichtungen und Sonstige. <sup>484</sup>
Brücken	„Brücken sind Überführungen eines Verkehrsweges über einen anderen Verkehrsweg, über ein Gewässer oder tiefer liegendes Gelände, wenn ihre lichte Weite rechtwinklig zwischen den Widerlagern gemessen 2,00 m oder mehr beträgt.“ <sup>485</sup>
Bussystem	Der Bus ist eine Datensammelleitung, die gemeinsam von allen Teilnehmern benutzt wird. Die Datenübertragung erfolgt direkt vom sendenden Teilnehmer zum Empfänger. Während dieser Datenübertragung können die anderen Teilnehmer keine Daten austauschen. <sup>486 487</sup>

---

<sup>481</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 31051:2012-09 Grundlagen der Instandhaltung. Berlin 2012, S. 7-8.

<sup>482</sup> Vgl. Ritter Frank: Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen- Modellierung und praxisnahe Prognose. Dissertation. Technischen Universität Darmstadt. Institut für Massivbau. Heft 22. Darmstadt 2011, S.41.

<sup>483</sup> Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 31051:2012-09: Grundlagen der Instandhaltung. S. 7.

<sup>484</sup> Vgl. Bundesministerium für Verkehr-, Bau und Wohnungswesen (Hrsg.): RI-BW-PRÜF:2013-03 – Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. S. 7.

<sup>485</sup> Vgl. Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): DIN 1076:1999-11 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung. Berlin 2011, S. 2, Abs. 3.1.1

<sup>486</sup> Vgl. Wormuth, Rüdiger, Schneider, Klaus-Jürgen (Hrsg.): Baulexikon: Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens. 2. Aufl. Berlin, 2009. S. 123.

<sup>487</sup> Buchholz, Günther: Fachkunde: Industrieelektronik und Informationstechnik. 9. Aufl. Haan-Gruiten, 2006. S. 413.

Datenbank	„Kollektion von Daten, die in einer Datenbasis zusammengetragen sind“ <sup>488</sup> .
Datensammlung	Menge an empirischen Daten, die für die Auswertung von Lebensdauern und Kostenkennwerten dokumentiert werden.
DTV	Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (Kfz/24h) gibt die Zahl der Kfz in beiden Richtungen an, die in einem bestimmten Zeitraum (im Allgemeinen ein Jahr) im Durchschnitt in 24 Stunden einen Straßenquerschnitt durchfahren. <sup>489</sup>
Funktionsbetrieb	Die eigentlichen Geschäftsprozesse der Nutzung des Objektes. <sup>490</sup> Im Falle der Verkehrsinfrastruktur entspricht der Funktionsbetrieb der Nutzung durch die Verkehrsteilnehmer. <sup>491</sup>
Funktionseinheit	Eine Funktionseinheit wird als eine Einheit bestehend aus mindestens einem Teil verstanden, die eine Funktion abgrenzen. Ein Objekt besteht aus der Summe aller Funktionseinheiten. <sup>492</sup>
Gesamtnutzungsdauer	Die ImmoWertV versteht in § 23 unter der Gesamtnutzungsdauer „die bei ordnungsgemäßer Bewirtschaftung übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer der baulichen Anlagen“. <sup>493</sup>
Herstellungskosten	Kosten (im Kontext dieser Arbeit), welche für die physische Realisierung des Objekts entstehen.
Instandhaltung	Die DIN 13306 und die DIN 31051 verstehen unter Instandhaltung die Summe sämtlicher Maßnahmen, die während der technischen Lebensdauer einer Einheit durchgeführt werden, um die Funktion der Einheit zu erhalten. <sup>494</sup>
Instandhaltungsstrategie	Die Instandhaltungsstrategie beschreibt jene Vorgehensweise, die das Management zum Erreichen der Instandhaltungsziele während der wirtschaftlichen Lebensdauer ausführt. <sup>495</sup>

---

<sup>488</sup> Schubert, Matthias: Datenbanken: Theorie, Entwurf und Programmierung relationaler Datenbanken, 2. Auflage. Wiesbaden 2007, S. 49.

<sup>489</sup> Vgl. Höfler, Frank: Verkehrswesen-Praxis: Band 2: Verkehrstechnik. 1. Aufl. Berlin, 2006. S. 94 – 95.

<sup>490</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre in: Bauingenieur 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

<sup>491</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S.271.

<sup>492</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S.40.

<sup>493</sup> Vgl. Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, ImmoWertV, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, § 23.

<sup>494</sup> Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN EN 13306:2018-02 Begriffe der Instandhaltung, 2.1; bzw. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: DIN 31051:2012-09: Grundlagen der Instandhaltung. 4.1.

<sup>495</sup> Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Grundlagen der Instandhaltung (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S.5. Punkt 2.4.

Instandsetzung	Unter Instandsetzung (im Kontext dieser Arbeit) werden alle Maßnahmen zusammengefasst, die aufgrund des Erreichens der technischen Lebensdauer der Rückführung des Ist-Zustandes einer Betrachtungseinheit in den ursprünglichen Soll-Zustand dienen und somit eine Veränderung des Wertes der Betrachtungseinheit mit sich bringen. Die Lebensdauer des Bauteils beginnt nach der Maßnahme wieder bei null.
Instandsetzungsgrenze $g_i$	Grenze der Überlebenswahrscheinlichkeit, die festlegt, wann die Instandsetzung erfolgt. Die Wahl der Grenzen der einzelnen Strategien ist von verschiedenen Aspekten abhängig. „Im Rahmen eines Top-Down-Ansatzes würden die Grenzen durch das Management bzw. die Verwaltung vorgegeben.“ <sup>496</sup>
Komponente	kleinste Bestandteile eines Bauteils.
Kostendatenbank	Datenbank, in die empirische Daten zu Kostenkennwerten für die Auswertung eingetragen werden.
Kostenkennwert	Wert, um das Verhältnis zwischen Kosten und geometrischen oder funktionalen Bezugseinheiten wiederzugeben. <sup>497</sup>
Kritikalität (im Allgemeinen)	Relatives Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat. <sup>498</sup>
Kritikalität (nach Ziegel)	Bedeutung einer Einheit verknüpft mit ihrer Umgebung (dem Objekt) auf das gesamtwirtschaftliche System, ausgedrückt in Korrelation mit dem Nutzenverlust bzw. Schaden im Falle einer Fehlfunktion. <sup>499</sup>
Lebensdauerdatenbank	Datenbank, in die empirische Daten zu Lebensdauern für die Auswertung eingetragen werden.
Lebensdauer $\lambda$	Lebensdauer, die sich unter Berücksichtigung der Instandsetzungsgrenze $g_i$ ergibt
Lebenszyklus	Der Lebenszyklus (im Kontext dieser Arbeit) eines Bauteils/ Objekts umfasst die Phasen von der Herstellung bis zum Abriss.

---

<sup>496</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 232.

<sup>497</sup> Vgl. Greiner, Peter et al.: Baubetriebslehre – Projektmanagement. 3. Auflage. vieweg & Sohn Verlag. Wiesbaden 2005. S.84.

<sup>498</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 272.

<sup>499</sup> Vgl. Ziegel, Christian Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 272.

Lebenszykluskosten	Der Begriff Lebenszykluskosten umfasst die Gesamtheit aller Kosten, die während der Lebensdauer eines Gebäudes anfallen- also alle Kosten, die ab dem Zeitpunkt der Idee bis zum Abschluss des Gebäudeabrisses entstehen. <sup>500</sup>
Leistungsbereich	Ausführungs- oder gewerkeweise Gliederung von Leistungen des Standardleistungskatalogs für den Straßen- und Brückenbau.
Lichtraumprofil	Ein Lichtraumprofil regelt den Raum, der freizuhalten und aufrecht zu erhalten ist, um den Verkehr von (Schiene-)Fahrzeugen zu ermöglichen. <sup>501</sup>
Merkmalsfaktor	Faktoren, welche sich auf verschiedene Merkmale eines Projekts beziehen und Einfluss auf die Kostenkennwerte haben. Diese sind in die Kostendatenbank einzutragen.
Mittelspannungsanlage	Bei Mittelspannungsanlagen wird der Strom mit einer Nennspannung zwischen 10 KV und 30KV eingespeist. Diese Art der Stromversorgung eignet sich für Tunnel mit einem Leistungsbedarf $\geq 80$ KW. <sup>502</sup>
Mischstrategie	Jeder Betrachtungseinheit eines Objekts wird eine Instandhaltungsstrategie auf Basis ihrer Kritikalität zugeordnet wird, so dass eine Mischstrategie für das gesamte Objekt entsteht. <sup>503</sup>
Niederspannungsanlage	Bei Niederspannungsanlagen wird der Strom mit einer Nennspannung zwischen 400V und 999V eingespeist. Diese Art der Stromspeisung eignet sich lediglich für Tunnel mit einem Leistungsbedarf $\leq 80$ kW. <sup>504</sup>
Objektbetrieb	Die Bewirtschaftung sowie die Finanzierung des Objektes. <sup>505</sup> Im Falle der (Verkehrs-)Infrastruktur Aufgabe der öffentlichen Hand und ihrer Erfüllungsgehilfen. <sup>506</sup>

---

<sup>500</sup> Vgl. Herzog, Kati: Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen. Dissertation am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt. 2005. S.39.

<sup>501</sup> Vgl. Haack, Alfred: Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA): Sachstandsbericht 2011 „Sanierung von Eisenbahntunneln“. Gütersloh 2011, S. 15.

<sup>502</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Ausgabe 2006, S.43.

<sup>503</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020.

<sup>504</sup> Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: RABT – Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln. Ausgabe 2006, S.43.

<sup>505</sup> Vgl. Zimmermann, Josef: Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre in: Bauingenieur 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

<sup>506</sup> Vgl. Ziegel, Christian: Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte. Dissertation. Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. München 2020. S. 273.

Objekteigenschaften	Jedes Objekt verfügt über Objekteigenschaften, welche die Konzeption, die Dimensionierung sowie die Lage im Netz der Bauteile bzw. der Elemente beschreiben. Objekteigenschaften beeinflussen das Leistungsniveau der betrieblichen Unterhaltung und sind damit Kosteneinflussgrößen von Investitionskosten.
Profibus	Process Field Bus: Serielles Bussystem zur Kopplung digitaler Feldautomatisierungseinheiten, wie z.B. speicherprogrammierbare Steuerungen, Stellgeräte und Messumformer. <sup>507</sup>
Standardraum	Ein Standardraum stellt eine Sammlung von Bauteilen und Positionen eines typischen Raumes einer spezifischen Nutzung bzw. eines typischen übergeordneten Konstruktionselementes dar, die zum Zwecke einer standardisierten Berechnung bestimmter Ausgabewerte wie bspw. der Herstellungskosten mit Formeln zur Mengenermittlung und entsprechenden Kennwerten je Bauteil bzw. Position hinterlegt ist. <sup>508</sup>
Standardraumstruktur	Eine Standardraumstruktur ist eine <i>„zusammenfassende Struktur von Standardräumen ..., die [es ermöglicht] ein Gebäude definierter Nutzung mit festgelegten Gebäudegeometrien und Standards sowie Anzahl und Größe nutzungsspezifischer Räume (Standardräume)“</i> zu beschreiben. <sup>509</sup>
Technische Lebensdauer LD	Die technische Lebensdauer beschreibt den Zeitraum zwischen Errichtung und Ausfall eines Bauteils. <sup>510</sup>
Tunnel	Nach ÖNORM B 2203 ist ein Tunnel ein „lang gestreckter, unterirdischer Hohlraum mit Ausbruchquerschnitt über 20 m <sup>2</sup> , vornehmlich für den Straßen- und Eisenbahnverkehr“. <sup>511</sup>
Verkehrsweg	Ein Verkehrsweg kann als Straße oder Schienenweg ausgeführt sein und dient der Überwindung von Räumen. <sup>512</sup>

---

<sup>507</sup> Hüberscher, Heinrich, Petersen, Hans-Joachim, Rathgeber, Carsten, Richter, Klaus, Scharf, Dirk (Hrsg.): IT-Handbuch: Tabellenbuch. Braunschweig, 2005. S. 128.

<sup>508</sup> Vgl. Kornblum, Florian: Bestimmung von Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von Grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien. Dissertation am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. 2017, S. 137-140.

<sup>509</sup> Vgl. Greitemann, Peter: Bestimmung der Bauzeit von Bauprojekten zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung. Dissertation am Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung an der Technischen Universität München. 2017, S. 109.

<sup>510</sup> Vgl. Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010.

<sup>511</sup> Vgl. ÖNORM B 2203- 1: Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 1: Zyklischer Vortrieb. Ausgabe 2001.12.01, S. 3.

<sup>512</sup> Vgl. Baum, Herbert; Behnke, Nils Christian: Der volkswirtschaftliche Nutzen des Straßenverkehrs. In: Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie e. V. (VDA) Nr. 82, 1997, S.1.

Wirtschaftliche Lebensdauer	Die wirtschaftliche Lebensdauer kennzeichnet den Zeitraum, in dem es ökonomisch sinnvoll ist, den Betrieb eines Objekts durch Instandsetzungsmaßnahmen aufrechtzuerhalten. Sie ist beendet, sobald die Kosten für die Aufrechterhaltung des Betriebs die Erträge übersteigen. <sup>513</sup>
Zukünftige Investitionskosten (im Kontext dieser Arbeit)	Kosten, welche während des Lebenszyklus eines Objekts für Maßnahmen der Instandsetzung anfallen.
Zustandsverlaufkurven	Kurve, die die Verringerung des Abnutzungsvorrates über die Zeit wiedergibt.
Zustandsbereiche	Der Zustand von Bauteilen wird mit Hilfe der Schadensbewertungen nach Ri-EBW-Prüf im Rahmen der Datensammlung von Lebensdauern als Zustandsbereich angegeben.
Zuverlässigkeit	die Wahrscheinlichkeit, „dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Funktions- und Umgebungsbedingungen nicht ausfällt.“ <sup>514</sup>

---

<sup>513</sup> Vgl. Bahr, Carolin; Lennerts, Kunibert: Lebens- und Nutzungsdauern von Bauteilen (Endbericht), Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010. S. 16, 17.

<sup>514</sup> Vgl. Bertsche, Bernd; Lechner, Gisbert: Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg 2004, S. 20.

## Literaturverzeichnis

- ABBÖ: „Vereinbarung zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen. Nummer 100/1/BA-A. HL-AG. asfinag und ÖBB.“ kein Datum.
- Agethen, Ulrich, Karl-Joachim Frahm, Konrad Renz, und Erik Peter Thees: *Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte*: Arbeitsblatt der BTE-Arbeitsgruppe, Essen: Bund Technischer Experten e.V. , kein Datum.
- Altmann, Isabella: „Einfluss von Veralterungsprozessen auf den Wert von Immobilien.“ Dissertation, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung Technische Universität München, 2017.
- Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2008/114/EG des Rates vom 8. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern. Brüssel, 2008.
- Bahr, Carolin, und Kunibert Lennerts: „Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen. Endbericht.“ Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung. 2010.
- Baukosteninformationszentrum Deutscher Architekten: „BKI-Baukosten.“ Stuttgart, 2017.
- Baum, Herbert; Behnke, Nils Christian: "Der volkswirtschaftliche Nutzen des Straßenverkehrs." In: Schriftenreihe des Verbandes der Automobilindustrie e. V. (VDA) Nr. 82, 1997.
- Bertsche, Bernd, und Gisbert Lechner: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau - Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten*: 3: überarbeitete und erweiterte Auflage: Bde: 3., überarbeitete und erweiterte Auflage: Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2004.
- Bielefeld, Bert, und Roland Schneider: *Kostenplanung*: 1 :Edition: Basel: Birkhäuser Verlag GmbH, 2014.
- Bonzel, Justus: „Beton mit hohem Frost- und Tausalz widerstand.“ *Betontechnische Berichte* 65, kein Datum.
- Bonzel, Justus, und Eberhard Siebel: „Neue Untersuchungen über den Frost- und Tausalz-Widerstand von Beton.“ *Betontechnische Berichte* 77, 1977.
- Bortz, Jürgen, und Christof Schuster: *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*: Berlin: Springer Verlag, 2010.
- Braun, Hans-Peter, Eberhard Oesterle, und Peter Haller: *Facility Management - Erfolg in der Immobilienwirtschaft*: 4, neu überarbeitete Auflage: Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2004.
- Breitenstein, Jürgen: „Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs.“ Herausgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen: *Verkehrstechnik*, Nr: Heft V 18 (1995).
- Buchholz, Günther: "Fachkunde: Industrieelektronik und Informationstechnik." 9. Auflage. Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer. 2006.



- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): „Kritische Infrastrukturen - Sektoren und Brancheneinteilung.“ 2021. [https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/KRITIS/kritis-sektoren-brancheneinteilung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/KRITIS/kritis-sektoren-brancheneinteilung.pdf?__blob=publicationFile&v=3) (Zugriff am 07. Dezember 2022).
- Bundesamt für Sicherheit und Informationstechnik, UP Kritis: „Öffentlich - Private Partnerschaft zum Schutz kritischer Infrastrukturen.“ Frankfurt am Main, 2004.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Brückenstatistik*. 2021. [https://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf%3F\\_\\_blob%3DpublicationFile%26v%3D7](https://www.bast.de/DE/Statistik/Bruecken/Brueckenstatistik.pdf%3F__blob%3DpublicationFile%26v%3D7) (Zugriff am 23. August 2022).
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Pavement-Management-System (PMS)*: kein Datum. <https://www.bast.de/DE/Strassenbau/Fachthemen/s6-pms.html?nn=1819110> (Zugriff am 25. August 2022).
- Bundesanstalt für Straßenwesen: „Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 geschlossene Bauweise.“ 2014.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Auswirkungen von neuen Fahrzeugkonzepten auf die Infrastruktur des Bundesfernstraßennetzes. Schlussbericht*. Bd. 2. Auflage. Bergisch Gladbach, 2006.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.319/1999/HRB: Ermittlung des Eingreifzeitpunktes für Erhaltungsmaßnahmen an Brücken und Ingenieurbauwerken*. Bergisch Gladbach: PTV AG Karlsruhe, KHP mbH Leipzig, 2001.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: „Richtzeichnungen für Ingenieurbauten. Kapitel 1, Blatt 1.“ 2017.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Straßenverkehrszählung 2010 und 2015*. 2018. [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Manuelle-Zaehlung.html?nn=1820340](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Statistik/Verkehrsdaten/2015/Manuelle-Zaehlung.html?nn=1820340).
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten*. 2014.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten: Teil 3 Massivbau- Abschnitt 4: Schutz und Instandsetzungen von Betonbauteilen*. 2019.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 5, Abschnitt 5 Abdichtung*. 2007.
- Bundesanstalt für Straßenwesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 8. Brückenausstattung. Abschnitt 1. Fahrbahnübergänge aus Stahl und Elastomer*. 2012.
- Bundesministerium für Digitales und Verkehr, Abteilung Straßenbau: „AKVS 2014: Anweisung zur Kostenermittlung und zur Veranschlagung von Straßenbaumaßnahmen. Ausgabe 11/20.“ 2020.
- Bundesministerium für Verkehr und Digitales: *Tunnel: Zahlen, Daten, Fakten*. 19.06.2019. <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/StB/tunnel-zahlen-daten-fakten.html> (Zugriff am 24. August 2022).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: „ASB- Anweisung Straßeninformationsbank - Segment Bauwerksdaten.“ Berlin, 2013.

- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: „Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken (RI-WI-BRÜ).“ 2007.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: „Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF)“ 2007.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung: „Anweisung Straßeninformationsbank.“ 10 2013.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: „Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz. ABBV.“ 01. 07 2010.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb: „Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen - Allgemeiner Teil.“ Berlin, 2021.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb: „Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen - Leistungsbereich 1 - Bauliche Unterhaltung.“ Berlin, 2021.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb: „Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen. Leistungsbereich 3: Wartung und Instandhaltung der Straßenausstattung.“ Bonn, 2021.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Länderfachgruppe Straßenbetrieb: „Leistungsheft für den Straßenbetriebsdienst auf Bundesfernstraßen. Leistungsbereich 4: Reinigung.“ Bonn, 2021.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: „Bundesverkehrswegeplan 2030.“ Berlin, 2016.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: „Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2016.“ Berlin, 2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: „Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2020.“ Berlin, 2022.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Finanzierung*. 2016. <https://www.bmvi.de/DE/Themen/Mobilitaet/Infrastrukturplanung-Investitionen/Finanzierung/finanzierung.html> (Zugriff am 30. Juli 2020).
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: „Investitionsrahmenplan 2019 - 2023 für die Verkehrsinfrastruktur des Bundes (IRP).“ Berlin, 2020.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Verkehr in Zahlen 2016/2017. 45. Jahrgang. Hamburg: DVV Media Group GmbH, 2016.
- Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie: Straßentunneln: Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen: RVS 13.03.41. Wien 2014.
- Bundeszentrale für politische Bildung: *Tourismusverkehr*. 2017. <https://www.bpb.de/kurzknapp/zahlen-und-fakten/globalisierung/52511/tourismusverkehr/> (Zugriff am 23. August 2022).
- C.4, World Road Association PIARC: Technical Committee: „Life Cycle Aspects of electrical roas tunnel equipment.“ 2010.

- Christen , Kurt, und Paul Meyer-Meierling: „Optimierte Zyklen und Finanzierung der Instandsetzung.“ *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 1999: 163-166.
- Christiansen, Hannes: *Konfidenzintervalle für kombinierte Wählermodelle*. Masterarbeit, Technische Universität Kaiserslautern, Fachbereich Mathematik: in Kooperation mit Fraunhofer Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik, 2015.
- Cohen, A. Clifford: „Maximum Likelihood Estimation in the Weibull Distribution Based on Complete and on Censored Samples.“ *Technometrics Vol.7, No.4*, 1965: 579-588.
- Der Präsident des Bundesrechnungshofes: "Gutachten der Bundesbeauftragten für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung über das Kostenmanagement im Bundesfernstraßenbau." Bonn: 2014.
- Design of Road Tunnels, Department for Transport: „Design Manual for roads and bridges (DMRB). Volume 2, Section 2, Part 9, BD 78/99.“ London, 1999.
- Deutsche Bahn AG: „Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung, Infrastrukturzustands- und entwicklungsbericht 2021.“ Berlin, April 2022.
- Deutsche Gesellschaft für Qualität: *Das Lebensdauernetz: Leitfaden zur grafischen Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen der Weibull-Verteilung*. Berlin: Beuth Verlag, 1995.
- Deutscher Bundestag (14. Wahlperiode): „Straßenbaubericht 2000. Drucksache 14/5064.“ Berlin, 2001.
- Deutscher Wetterdienst: *Klimastatusbericht Deutschland - Jahr 2020*. Offenbach am Main: Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, 2021.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN EN 15643-4: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, April 2012.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN EN 1991-1-4/NA. Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-4: Allgemeine Einwirkungen Windlasten.“ Berlin, 2010.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN EN 1991-1-3: Nationaler Anhang- National festgelegte Parameter. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.“ Berlin, 2019.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN IEC 60050-351: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351 Leittechnik.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN 67524-1:2019-01: Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen - Teil 1: Allgemeine Gütekriterien und Richtwerte. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2019.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN 276:2017-07: Entwurf: Kosten im Bauwesen.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: Überwachung und Prüfung.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, 1999.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN 31051:2012-09: Grundlagen der Instandhaltung.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- Deutsches Institut für Normung e.V: „DIN 13306:2015-12: Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.

- Deutsches Institut für Normung e.V.: „DIN 277-1: Grundflächen und Rauminhalte von Bauwerken im Hochbau Teil 1: Begriffe, Ermittlungsgrundlagen.“ Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- Eichinger-Vill, Eva-Maria, und Johann Kollegger: „Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten.“ Herausgeber: Gerhard Mehlhorn, & Manfred Curbach. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: „Richtlinie Funksysteme in Straßentunneln.“ 2007.
- Eismann, Klaus: „Steigerung der Tunnelsicherheit durch Erneuerung der Tunnelsteuerung.“ *Tunnel*, 2011.
- Engelhardt, Stephan: „Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken.“ Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München, 2015.
- Fendrich, Lothar; Fengler, Wolfgang: „Handbuch Eisenbahninfrastruktur.“ 3., Überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- Fetouki, Hamid: „Robuste Schätzungen der Parameter der Weibull-Verteilung.“ Diplomarbeit, Institut für Mathematik, Universität Kassel, Kassel, 2011.
- Forkert, Lothar: *Verfahren zur Prognose von Schadensentwicklungen bei einer kostenoptimierten Brückeninstandhaltung.* Dissertation. Düsseldorf: VDI Verlag, 1990.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik Straßenerhaltung: AP 9 - Arbeitspapeire zur Systematik der Straßenerhaltung.* FGSV Verlag GmbH, 2003.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik Straßenerhaltung: Arbeitspapeire zur Systematik der Straßenerhaltung AP 9/A1.1. zur ZEB.* FGSV Verlag GmbH, 2001.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik Straßenerhaltung: Arbeitspapeire zur Systematik der Straßenerhaltung AP 9/R1 zur ZEB.* FGSV Verlag GmbH, 2001.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik Straßenerhaltung: Arbeitspapeire zur Systematik der Straßenerhaltung AP 9/S zur ZEB.* FGSV Verlag GmbH, 2003.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *RABT - Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln.* Köln: FGSV Verlag GmbH, 2016.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra 01).* Köln: FGSV Verlag GmbH, 2001.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau.“ 2022.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: Richtlinien für die Anlage von Autobahnen. Ausgabe 2008.“ Bonn, 2009.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: Richtlinien für die Anlage von Landstraßen. Ausgabe 2012.“ Bonn, 2013.

- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Richtlinie für die Anlage von Straßen – Teil Entwässerung – RAS-Ew. Ausgabe 2005.“ Bonn, 2005.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Teil 7: Brückenbeläge. Abschnitt 1.* Köln: FGSV Verlag, 2003.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitsgruppe „Straßenentwurf“: Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme – RPS, Ausgabe 2009. Bonn 2010.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Arbeitsgruppe „Infrastrukturmanagement“: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO). Ausgabe 2012.“ Bonn, 2012.
- Franz, Jürgen: *Dresdner Schriften zur mathematischen Stochastik.* Dresden: Vorlesungen über die Zuverlässigkeit und Statistik bei reparierbaren Systemen, 2016.
- Freudenthal A., Gumbel, Emil Julius.: Maximum Life in Fatigue. American Statistical Association Journal. New York: Taylor & Francis, 1954, S. 575-597.
- Freundt, Ursula, und Dirk Hölzer: „Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten.“ Herausgeber: Gerhard Mehlhorn, & Manfred Curbach. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- Frey, Rene L. : „Infrastruktur.“ In *Handwörterbuch der Raumordnung.* Hannover: Akademie für Raumforschung und Landesplanung, 2005.
- Göpfert, Jan: *Modulare Produktentwicklung - Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation.* Dissertation, Universität München, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, 1998.
- Galambos, János: *The asymptotic theory of extreme order statistics.* New York: John Wiley & Sons Inc, Wiley series in probability and mathematical statistics, 1978.
- Geißler, Karsten: *Handbuch Brückenbau. Entwurf, Konstruktion, Berechnung, Bewertung und Ertüchtigung.* Berlin: Ernst & Sohn Verlag, 2014.
- Genschel, Ulrike, und William Q. Meeker: „A Comparison of Maximum Likelihood and Median-Rank Regression for Weibull Estimation.“ *Quality Engineering*, 08 2010: 236-255.
- Gertz, Carsten: „Verkehrsplanung, Bau und Betrieb von Verkehrsanlagen.“ 3. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2021.
- Glöckler, Michael: *Simulation mechatrischer Systeme: Grundlagen und technische Anwendung.* Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014.
- Greiner, Peter et al.: "Baubetriebslehre – Projektmanagement." 3. Auflage. Wiesbaden: vieweg & Sohn Verlag, 2005.
- Greitemann, Peter: „Bestimmung der Bauzeit von Bauprojekten zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung.“ Dissertation, Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2017.
- Großmann, Andreas; Pauli, Lena: *Wirtschaftlichkeitsuntersuchung von Sonderflächen in Betonbauweise im Life Cycle.* Hochschule Konstanz, University of Applied Sciences. [https://www.htwg-konstanz.de/fileadmin/pub/fk\\_bi/Fakultaet\\_BI/Veroeffentlichungen/Grossmann\\_Pauli\\_Paper\\_deutsch.pdf](https://www.htwg-konstanz.de/fileadmin/pub/fk_bi/Fakultaet_BI/Veroeffentlichungen/Grossmann_Pauli_Paper_deutsch.pdf) (Zugriff am 7. Dezember 2022).

- Gumbel, Emil Julius: *Statistics of extremes.*: Columbia University Press, New York, 1958.
- Gutenberg, Erich: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion.* 24. unveränderte Auflage. 3 Bde. Berlin/ Heidelberg/ New York: Springer Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1971.s
- Gutenschwager, Kai, Markus Rabe, Sven Spieckermann, und Sigrid Wenzel: *Simulation in Produktion und Logistik.* Berlin: Springer Vieweg, 2017.
- Hölzgen, Michael: *Erhaltungskosten von Brücken.* Düsseldorf: VDI Verlag, 1991.
- Härtler, Gisela: *Statistik für Ausfalldaten - Modelle und Methoden für Zuverlässigkeitsuntersuchungen.* Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2016.
- Härtler, Gisela: *Statistische Methoden für die Zuverlässigkeitsanalyse.* Berlin: Verlag Technik, 1983.
- Haack, Alfred: „Sachstandsbericht 2015, Instandsetzung von Straßentunneln.“ Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA). Gütersloh: Bauverlag BV GmbH, 2015.
- Haack, Alfred: „Sachstandsbericht 2011 Sanierung von Eisenbahntunneln.“ Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V. (STUVA). Gütersloh: Bauverlag BV GmbH, 2011.
- Haardt, Peter: *Entwicklung eines Bauwerk-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz- Stufe 1 und 2.* Herausgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen. 2002.
- Haldor E., Joachim; Lademann, Frank: „Planung von Bahnanlagen: Grundlagen – Planung – Berechnung.“ 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2018.
- Hauptverband der deutschen Bauindustrie e.V., und Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e.V.: *Kosten- und Leistungsrechnung der Bauunternehmen - KLR Bau.* 7. aktualisierte Auflage Bde. Wiesbaden, Berlin, Düsseldorf, 2001.
- Hedderich, Jürgen, und Lothar Sachs: *Angewandte Statistik - Methodensammlung.* 15. überarbeitete und erweiterte Auflage Bde. Berlin: Springer Spektrum, 2016.
- Hedtstück, Ulrich: *Simulation diskreter Prozesse.* Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- Herzog, Kati: „Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen.“ Dissertation, Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2005.
- Hirschman, Albert O.: *Die Strategie der wirtschaftlichen Entwicklung.* Hamburg: Gustav Fischer Verlag, 1966.
- HOAI: Honorarordnung für Architekten und Ingenieure. kein Datum.
- Hoffeller, Marina: *Kostengliederung, Kostenkennwerte und Lebensdauern von Tunnelbauwerken.* Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. 2016.
- Holst, Ralph: *Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz. Stufe 3, Heft B 50.* Bremerhaven: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Wirtschaftsverlag NW, 2006.
- Höfler, Frank: "Verkehrswesen-Praxis." *Band 2: Verkehrstechnik.* 1. Auflage. Berlin: Bauwerk-Verlag, 2006.

- Hüberscher, Heinrich, Petersen, Hans-Joachim, Rathgeber, Carsten, Richter, Klaus, Scharf, Dirk (Hrsg.): *"IT-Handbuch: Tabellenbuch"*. Braunschweig: Westermann, 2005.
- Impulsprogramm Bau: „Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten.“ Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1994.
- International Organization for Standardization: ISO 15686-1:2011. „Buildings and Constructed Assets- Service Life Planning- Part 1: General Principles and framework.“ Genf, Mai 2011.
- Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur- Grundlage der marktwirtschaftlichen Entwicklung*. Tübingen: J.C.B. Mohr (Paul Siebeck), 1966.
- Juskowiak, Jochen: „Beanspruchungsgerechte Bestimmung des Weibull-Formparameters für Zuverlässigkeitsanalysen.“ Dissertation, Institut für Maschinenelemente, Bericht Nr. 173, Universität Stuttgart, 2017.
- Katsenelson, Jenya: *Entwicklung einer Kostendatenbank für Straßenbrücken für die Implementierung in BIM*. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. 2021.
- König, Gert, Reinhard Maurer, und Tilman Zichner: *Spannbeton: Bewährung im Brückenbau*. Berlin: Springer Verlag, 1986.
- Küchler, Michael: „Instandsetzung von Betontragwerken.“ In *Betonkalender*, Herausgeber: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos, & Johann-Dietrich Wörner. Berlin, München, Düsseldorf: Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, 2013.
- Karcher, Carsten: „Ursachen und Entstehungsmechanismen von Straßenschäden. Kolloquium "Vermeidung von Straßenschäden in Kommunen" am 23.11.2011.“ Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- Kirch, Mirko: *Instandhaltungsmanagement der technischen Anlagen im Infrastrukturbereich*. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. November 2018.
- Kohn, Wolfgang: *Statistik - Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin: Springer Verlag, 2005.
- Kolonko, Michael: *Stochastische Simulation - Grundlagen, Algorithmen und Anwendungen*. Wiesbaden: Vieweg+Tauber, 2008.
- Kommission Zukunft der Verkehrsinfrastrukturfinanzierung: *Abschlussbericht; Vorsitzender der Kommission: Karl-Heinz Daehre*. Berlin, 2012.
- Kommission Verkehrsinfrastrukturfinanzierung: *Schlussbericht; Vorsitzender der Kommission: Wilhelm Pällmann*. Berlin, 2000.
- Kommission Nachhaltige Verkehrsinfrastrukturfinanzierung: *Konzeptdokument; Vorsitzender der Kommission: Bundesminister a. D. Kurt Bodewig*. Berlin, 2013.
- Kornblum, Florian: *Bestimmung der Herstellungs- und Instandsetzungskosten sowie dem Verbrauch von grauer Energie bei der Realisierung und dem Betrieb von Immobilien*. Dissertation, Technische Universität München: Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2018.
- Kracke, Ernst-August, und Klaus Lodde: *Leitfaden Straßenbrücken - Entwurf, Baudurchführung, Erhaltung*. Bde. Bauingenieur-Praxis. Berlin: Ernst, 2011.

- Krug, Klaus-Eberhard: „Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung.“ Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985.
- Kuckartz, Udo, Stefan Rädiker, Thomas Ebert, und Julia Schehl: *Statistik - Eine verständliche Einführung*. Bd. 1. Auflage. Wiesbaden: VS, Verlag für Sozialwissenschaften, 2010.
- Kudlich, Thomas: *Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation*. Dissertation, Technische Universität München: Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss, Logistik, 2000.
- Kuen, Tamara: *Quantifizierung von Herstellungsverfahren im Brückenbau unter besonderer Berücksichtigung deren Standardisierung hinsichtlich Kosten und Zeit*. Master's Thesis, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung Technische Universität München, 2017.
- Lüesse, Gerd: „Gezielte Bauwerkserhaltung-Erfahrungen aus der Praxis in einem Flächenland.“ *Straße + Autobahn*, 1998.
- Ladner, Marc: „Systematische Auswertung von Schäden an Brücken.“ Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA Dübendorf. Bern 1994.
- Landschaftsverband Rheinland, Straßenbauverwaltung, Referat Brücken- und Tunnelbau: „Finanzbedarf für die Unterhaltung und Erneuerung des Bauwerke.“ Köln, 1984.
- Lauwe, Peter, und Christoph Riegel: *Schutz kscher Infrastrukturen*. Herausgeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Bonn, 2008.
- Lawless, Jerald F: *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*. Bd. Second Edition. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J.: *Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung*: [Forschungsprojekt des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu) im Auftrag der Wüstenrot-Stiftung]. Edition Difu - Stadt, Forschung, Praxis 10. Berlin: Dt. Inst. für Urbanistik, 2010.
- Marshall, Tim, und Michael Erlhoff: *Design dictionary: Perspectives on design terminology*. Board of international Research in Design. Basel, Boston: Birkhauser Verlag, 2008.
- Matyas, Kurt: „Ganzheitliche Optimierung durch individuelle Instandhaltungsstrategien.“ *Industrie Management* 18, 2002.
- Mayer, Franz Xaver: „Kostensicherheit zum Zeitpunkt der Realisierungsentscheidung.“ Dissertation, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung Technische Universität München, 2013.
- Menius, Reinhard; Matthews, Volker: „Bahnba und Bahninfrastruktur.“ 10. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2020.
- Nelson, Wayne B: *Applied life data analysis*. Hoboken, NJ: Wiley, 2004.
- Osterried, Julia: „Betriebskosten der Straßenverkehrsinfrastruktur als Funktion von Objekt- und Netzeigenschaften.“ Dissertation, Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2020.
- Oxford Reference: *Stichwort: social overhead capital*. kein Datum. <https://www.oxfordreference.com/view/10.1093/oi/authority.20110803100515344> (Zugriff am 24. 08 2021).



- ÖNORM B 2203- 1: „Untertagebauarbeiten - Werkvertragsnorm - Teil 1: Zyklischer Vortrieb.“ Ausgabe 2001.12.01.
- PIARC Committee on Road Tunnel Operation: „Good practice for the operation and maintenance of road tunnels.“ 2005.
- Plaßmann, Wilfried, und Detlef Schulz: *Handbuch Elektrotechnik: Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker*. Bde. 6., neu bearbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2013.
- ProMobilität- Initiative für Verkehrsinfrastruktur: *ProMobilität*. Oktober 2020. [https://www.promobilitaet.de/fileadmin/user\\_upload/Zahlen\\_Daten\\_Fakten\\_zum\\_Verkehrstat\\_2021.pdf](https://www.promobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Zahlen_Daten_Fakten_zum_Verkehrstat_2021.pdf) (Zugriff am 8. August 2022).
- Prummer, Esther: Einflüsse auf die Lebensdauer von Bauteilen von Straßen, Brücken und Tunneln. Bachelor's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. 2021.
- Puhani, Josef: *Kleine Formelsammlung zur Statistik*. Wiesbaden: Springer Gabler, 2020.
- Reichelt, Klaus: *Rechnerische Ermittlung der Kenngrößen der Weibullverteilung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1978.
- Rinne, Horst: *The Weibull Distribution - A Handbook*. New York: Chapman & Hall/CRC, 2008.
- Ritter, Frank: „Lebensdauer von Bauteilen und Bauelementen. Modellierung und praxisnahe Prognose.“ Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2011.
- Rose, Karl: *Kosten der Erhaltung von Brückenbauwerken*. Dissertation, Düsseldorf: VDI Verlag, 1989.
- Rossmann, Axel: *Strukturbildung und Simulation technischer Systeme Band 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme - Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- Schiemann, Wolfgang: „Schienenverkehrstechnik.“ August 2002. 1 Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2002.
- Schmuck, A., und M. Löffler: „Untersuchung des Planungsfalls "Straßenerhaltung" für das überörtliche Straßennetz in Hessen. Schlussbericht zum Untersuchungsauftrag des Hessischen Landesamts für Straßenbau.“ 1985.
- Schmitt, Jonas: *Kostengliederung, Kostenkennwerten und Lebensdauern der technischen Anlagen von Ingenieurbauwerken*. Master's Thesis. Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung. Technische Universität München. 2018.
- Schröder, Jules: „Zustandsbewertung großer Gebäudebestände.“ *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 1989: 449-459.
- Schubert, Matthias: "Datenbanken: Theorie, Entwurf und Programmierung relationaler Datenbanken." 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Teubner Verlag. 2007.
- Schulter, Daniel, und Peter Maydl: *Nachhaltigkeit massiv. Lebensdauer von Bauteilen und Bauprodukten*. Graz: Technische Universität Graz, 2009.

- Schulz, Wolfgang H, und Miriam Mainka: „Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Sperrung der A1-Rheinbrücke für den LKW-Verkehr.“ *Wissenschaftliche Studie im Auftrag von Pro Mobilität*, 2013.
- Schwind, Martin: *Allgemeine Staatengeographie*. Bd. VIII. Berlin: Walter de Gruyter, 1972.
- Siemon, Klaus D: *Baukostenplanung- und steuerung bei Neu- und Umbauten*. 6. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- Smith, Adams: *Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen*. 12. Auflage. München: Dtv 30149. Deutscher Taschenbuch-Verlag GmbH & Co. KG, 2009.
- Socina, Mihai, und Chrstian Komma: *Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien*. Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur Abteilung Straßenbau. Bd. Heft 1113. Bonn, März 2015.
- Spinner, Sebastian: „Untersuchung des Einflusses der Nutzungsintensität auf die Lebensdauer von Bauteilen von Infrastrukturbauwerken der KGR 300 und 400.“ Master's Thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2018.
- Stowasser, Josef: *Der kleine Stowasser: lateinisch-deutsches Schulwörterbuch*. München, 1968.
- Statistisches Bundesamt: *Pressemitteilung Nr. N 048 vom 21.07.2021*. 2021. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21\\_N048\\_61.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_N048_61.html). (Zugriff am 25. August 2022).
- Statistisches Bundesamt: *Baupreisindizes für Straßenbau und Brückenbau*. 2022. [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Grafiken/Preise/Baupreise-Immobilienpreisindex/2021/\\_Interaktiv/20210721-baupreisindex-strassen.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Grafiken/Preise/Baupreise-Immobilienpreisindex/2021/_Interaktiv/20210721-baupreisindex-strassen.html) (Zugriff am 25. August 2022).
- Straßen.NRW: *Infrastruktur: "Schwarze Null" sorgt für bröckelnde Brücken*. kein Datum. <https://bund-laender-nrw.verdi.de/land/strassen-nrw/++co++ab5b47ec-a317-11e5-aec6-525400ed87ba> (Zugriff am 24. August 2021).
- Strunz, Martn: *Instandhaltung- Grundlagen, Strategien, Werkstätten*. Berlin: Springer Vieweg, 2012.
- Thienel, Karl-Christian: „Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung - Versuche und Modellbildung.“ Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Technische Universität Braunschweig, 1993.
- Thoman, Darrel R., Lee j. Bain, und Charles E: Antle. „Inferences on the Parameters of the Weibull Distribution.“ *Technometrics* 11:3, 1969: 446-460.
- Traufetter, Gerald: *Deutschlands Brücken sind noch maroder als befürchtet*. 12. 01 2022. <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/deutschland-bruecken-sind-noch-maroder-als-befuerchtet-a-4ae84c75-afaf-444d-ac0a-dd3016638def> (Zugriff am 10. August 2022).
- Verein Deutscher Ingenieure: „VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1.“ Düsseldorf, 2004.
- Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, ImmoWertV, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, § 23.
- Vogt, Peter: „Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten.“ Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Ruhr Universität Bochum, Bochum, 2012.

- von Drachenfels, (ohne Vorname): *Erfahrung mit Wartung und Unterhaltung von Brücken*. Essen: Vortragsveranstaltung Instandsetzung von Brücken, 1984.
- Wöhe, Günther, Ulrich Döring, und Gerrit Brösel: *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Valens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Verlag Franz Vahlen, 2016.
- Wannenwetsch, Helmut: *Integrierte Materialwirtschaft, Logistik und Beschaffung*. Bd. 5. neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2014.
- Weber, Silvia: *Betoninstandsetzung: Baustoff - Schadensfeststellung - Instandsetzung*. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- Welte, Urs: *Knowing the useful life period of technical equipment - a prerequisite for safe tunnel operations*. Graz: International Conference Tunnel Safety and Ventilation, 2004.
- Wilhelm, Martin: „Instandhaltungsstrategien unter Berücksichtigung stochastischer Alterungsprozesse. Ein Beitrag zur systematischen Bewirtschaftung von Immobilien.“ Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2011.
- Wittke, Berndt: „Darstellung eines Verfahrens zur Beschreibung und Bewertung von Schadensfällen an Bauwerken im Hinblick auf eine Risikoabschätzung, gezeigt an Spannbetonbrücken.“ Dissertation, Konstruktiver Ingenieurbau, Technische Hochschule Darmstadt, Darmstadt, 1986.
- Wormuth, Rüdiger, Schneider, Klaus-Jürgen (Hrsg.): *Baulexikon: Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens*. 2. Auflage. Berlin: Beuth Verlag, 2009.
- Ziegel, Christian: „Entwicklung von Standardraumstrukturen zur Kostenermittlung von Wohnimmobilien.“ Master's Thesis, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, Technische Universität München, 2016.
- Ziegel, Christian: „Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte.“ Dissertation, Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2020.
- Zimmermann, Josef: „Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre.“ *Bauingenieur*, 2015, Nr. 90 (2015) Ausg.
- Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung*. München: Technische Universität München Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2019.
- Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden. Vorlesungsskriptum zur gleichnamigen Vorlesung*. München: Technische Universität München Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, 2019.
- Zimmermann, Josef: „Immobilienentwicklung.“ In *Bautabellen für Architekten: Mit Entwurfshinweisen und Beispielen*, Herausgeber: Klaus-Jürgen Schneider et al. Köln: Bundesanzeiger Verlag GmbH, 2014.
- Zimmermann, Josef, Marina Hoffeller, Julia Osterried, und Christian Ziegel: „Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase.“ Forschungsbericht, München, 2017.
- Zimmermann, Josef, und Christian Ziegel: „Kostenermittlung in frühen Projektphasen mit Standardraumstrukturen im Wohnungsbau.“ *Bauingenieur*, 10/2019.

Zimmermann, Josef, und Maximilian Reiser: „Prognose des Verbrauchs grauer Energie über die Lebensdauer von Gebäuden.“ *Bautechnik*, Oktober 2020: 63-73.

Zimmermann, Josef, Wolfgang Eber, und Carsten Tilke: „Unsicherheiten bei der Realisierung von Bauprojekten - Grenzen einer wahrscheinlickeitsbasierten Risikoanalyse.“ *Bauingenieur*, Juni 2014: 272-282.

## **Anhangverzeichnis**

Anhang A: Standardräume Brücke	278
Anhang B: Standardräume Tunnel	284
Anhang C: Standardräume Straßenverkehrswege	302

## Anhang A – Standardräume Brücke

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					
108								0,00 €	
					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Erbau Widerlager</b>				0,00 €	
108	Erbau		01-01-01	Baugrube herstellen, Aushub Bodenklasse 3 bis 5: leicht bis schwer lösbar		m <sup>3</sup>	7,92 €		
			01-01-02	Bauwerk hinterfüllen, unter Vorfluthöhe, einbauen und verdichten, schwach durchlässiger Boden, gem. RiZ-ING Was7		m <sup>3</sup>	23,26 €		
			01-01-03	Bauwerk hinterfüllen, Entwässerungsbereich, einbauen und verdichten, grobkörniger Boden, gem. RiZ-ING Was7		m <sup>3</sup>	25,17 €		
			01-01-04	Baugrube verfüllen, einbauen und verdichten, gemischtkörniger Boden		m <sup>3</sup>	16,57 €		
			01-01-05	Oberboden abtragen		m <sup>2</sup>	18,46 €		
				<b>Erbau Pfeiler</b>					
			01-01-06	Baugrube herstellen, Aushub Bodenklasse 3 bis 5: leicht bis schwer lösbar		m <sup>3</sup>	6,75 €		
			01-01-07	Baugrube verfüllen, einbauen und verdichten, gemischtkörniger Boden		m <sup>3</sup>	14,47 €		
01-01-08	Oberboden abtragen		m <sup>2</sup>	18,46 €					

Abbildung 8-1: Standardraum Erdbau

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					
117								0,00 €	
					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Flachgründung Fundament unter Widerlager</b>					
117	Gründung	Flachgründung	01-02-01	Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche		m <sup>2</sup>	12,42 €		
			01-02-02	Fundament Widerlager C30/37, mit Schalung		m <sup>3</sup>	159,18 €		
			01-02-03	Bewehrung Fundament Widerlager B500B		t	816,64 €		
				<b>Flachgründung Fundament unter Stütze/Pfeiler</b>					
			01-02-04	Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche		m <sup>2</sup>	12,60 €		
			01-02-05	Fundament aus Stahlbeton C30/37, XC2, XD2, XF2, XA1, inkl. Schalung, Bew. gesondert		m <sup>3</sup>	159,18 €		
		01-02-06	Bewehrung, Betonstahl 500 S		t	816,64 €			
			<b>Tiefgründung mit Bohrpfehl unter Fundament</b>						
		01-02-07	Sauberkeitsschicht C8/10, Dicke = 10 cm über Fundamentfläche		m <sup>2</sup>	12,60 €			
		01-02-08	Pfahlkopfplatte aus Stahlbeton C35/45, XC2, XD2, XF1, XA3, inkl. Schalung, Bew. gesondert		m <sup>3</sup>	148,94 €			
		01-02-09	Bewehrung, Betonstahl 500 S		t	949,03 €			
		01-02-10	Pfahlgründung aus bewehrten Ortbetonbohrpfählen, Stahlbeton C30/37, XC2, XD2, XA1, D = 120 cm, Pfahlhöhe von 7,50 bis 9,00 m, Pfahlneigung 10:1, Pfähle verrohrt bohren, Bew. gesondert, Leerrammungen bzw. Leerbohrungen bis 1 m je Pfahl		m	341,28 €			
		01-02-11	Pfahlköpfe von Ortbetonpfählen erschütterungsarm abarbeiten, Bewehrung säubern und ausrichten		Stk.	187,23 €			
01-02-12	Bewehrung, Betonstahl B 500 B, Ortbetonbohrpfähle		t	970,27 €					
01-02-13	Gerätesatz für Pfähle		Stk.	6.359,99 €					

Abbildung 8-2: Standardraum Gründung

## Anhang A – Standardräume Brücke

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP		
118								0,00 €		
				<b>Tragende Konstruktionen</b>						
118	Unterbau	Widerlager	01-03-01	Pfeiler/Stützen einschl. Auflagerbank ohne Lagersockel aus Stahlbeton C35/45, XC4, XD2, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert		m³	296,89 €			
			01-03-02	Widerlager und Flügelwände einschl. Auflagerbank, Kammerwänden und Auskragungen aus Stahlbeton C30/37, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. Gesondert		m³	293,31 €			
			01-03-03	Lagersockel aus Stahlbeton C35/45, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert		m³	1.348,07 €			
			01-03-04	Bewehrung Pfeiler, Betonstahl 500 S		t	898,43 €			
			01-03-06	Bewehrung Widerlager, Betonstahl 500 S		t	957,91 €			
				<b>Nicht tragende Konstruktionen</b>						
			01-03-06	Auflagersockel für Rückflächenentw. gem. RIZ-ING Was 7 aus unbewehrten Beton C12/15, inkl. einseitiger Schalung		m³	331,34 €			
				<b>Schutzbauteile</b>						
			01-03-07	Abdeckung als Vogelschutz gem. RZ VES 1, einschl. ggf. erf. Stahlwinkelrahmen und Befestigungsteile, alle Stahlteile feuerverzinkt, Befestigungsteile und Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4571, zwischen Überbau und Widerlagerbank, Abdeckung aus Polycarbonat, 4 mm dick, Konstruktion direkt am Beton befestigen		Stk.	210,55 €			
			01-03-08	Abdeckung von Nischen in abnehmbaren Teilstücken aus eloxiertem Aluminiumblech, Blechdicke 3 mm, einschl. ggf. erf. Stahlwinkelrahmen und Befestigungsteile, alle Stahlteile feuerverzinkt, Befestigungsteile und Verbindungsmittel aus nichtrostendem Stahl, Werkstoff-Nr. 1.4571		m	252,05 €			
				<b>Vertikale Bauteile, sonstiges</b>						
			01-03-09	Jahreszahl aus Naturstein in der Größe 455/255/50 mm herstellen und in Aussparung 475/275/70 mm versetzen		Stk.	359,09 €			
			01-03-10	Höhenmesspunkte mit Kugelbolzen, feuerverzinkt		Stk.	26,04 €			
			01-03-11	Höhenmesspunkte mit Linsenkopfbolzen, (Senkniete), aus Messing		Stk.	18,36 €			
				<b>Horizontale Bauteile, Beläge</b>						
			01-03-12	Fugeneinlage hor. Kammerwand/Überbau, Hartschaumplatte 3cm		m²	32,90 €			
			01-03-13	Fugeneinlage vert. Kammerwand+Flügelwand/Überbau, Hartschaumplatte 3cm		m²	34,33 €			
01-03-14	Fugenband außenliegend, hor. Widerlager/Kammerwand, A250		m	50,10 €						
01-03-15	Fugenband außenliegend, hor. Überbau/Kammerwand od. Widerlager, AM250		m	51,75 €						
01-03-16	Fugenband außenliegend, vert. Raumfuge Widerlagerwand luftseitig, AM250 inkl. Fugeneinlage aus Hartschaumplatten, Fugenabschlussband, RIZ-ING Fug1		m	51,75 €						
01-03-17	Fugenband außenliegend, vert. Raumfuge Widerlagerwand erdseitig, AM250 inkl. Fugeneinlage aus Hartschaumplatten, Fugenabschlussband, RIZ-ING Fug1		m	51,75 €						

Abbildung 8-3: Standardraum Unterbau

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	
118								0,00 €	
				<b>Massivplatte</b>					
118	Überbau	Massivplatte	01-04-01	Überbaukonstruktion als Vollplatte einschl. Gehwegaustragung aus Stahl- bzw. Spannbeton C35/45, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert		m²	243,53 €		
			01-04-02	Maschinelle Glättung der Betonoberfläche des Überbaus		m²	2,81 €		
			01-04-03	Bewehrung, Betonstahl B 500 B		t	933,83 €		
			01-04-04	Spannstahl für Längsvorspannung, 1660/1860 N/mm², nachträglicher Verbund, Verpressmaterial in Hüllrohr einpressen, inkl. Hüllrohre, Umhüllungen, Durchführungen, Kopplungen, Anker und dgl.		t	2.916,99 €		
					<b>Plattenbalken</b>				
		01-04-05	Überbaukonstruktion als Plattenbalken einschl. Gehwegaustragung aus Stahl- bzw. Spannbeton C35/45, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. Gesondert		m²	418,05 €			
		01-04-06	Maschinelle Glättung der Betonoberfläche des Überbaus		m²	2,81 €			
		01-04-07	Bewehrung, Betonstahl B 500 B		t	933,83 €			
		01-04-08	Spannstahl für Längsvorspannung, 1660/1860 N/mm², nachträglicher Verbund, Verpressmaterial in Hüllrohr einpressen, inkl. Hüllrohre, Umhüllungen, Durchführungen, Kopplungen, Anker und dgl.		t	2.916,99 €			
					<b>Hohlkasten</b>				
		01-04-09	Maschinelle Glättung der Betonoberfläche des Überbaus		m²	2,05 €			
		01-04-10	Bewehrung, Betonstahl B 500 B		t	856,63 €			
		01-04-11	Spannstahl für Längsvorspannung, 1570/1770 N/mm², nachträglicher Verbund, Verpressmaterial in Hüllrohr einpressen, inkl. Hüllrohre, Umhüllungen, Durchführungen, Kopplungen, Anker und dgl.		t	2.725,76 €			
01-04-12	Spannstahl für Längsvorspannung, 1470/1670 N/mm², externe Spanglieder, ggf. vorh. Umhüllung mit Korrosionsschutzmaterial füllen, inkl. Hüllrohre, Umhüllungen, Durchführungen, Kopplungen, Anker und dgl.		t	5.579,81 €					
01-04-13	Überbaukonstruktion als Hohlkasten einschl. Gehwegaustragung aus Stahl- bzw. Spannbeton C35/45, XC4, XD1, XF2, inkl. Sichtflächenschalung, Bew. gesondert		m³	245,41 €					

Abbildung 8-4: Standardraum Überbau

## Anhang A – Standardräume Brücke

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
121								0,00 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Lager</b>				
121	Lager	Einbau	01-05-01	Elastomerlager, fest, gem. DIN EN 1337-1 Nr.1.6		Stk	2.079,63 €	
			01-05-02	Elastomerlager zweiachsig beweglich		Stk	2.895,67 €	
			01-05-03	Elastomerlager, einachsig bewegliches Gleitteil, Festhaltekonstruktion für eine Achse, gem. DIN EN 1337-1 Nr.1.3		Stk	2.720,49 €	
			01-05-04	Kalottenlager, fest, gem. DIN EN 1337-1 Nr.3.1 oder 3.2		Stk	4.466,22 €	
			01-05-05	Kalottenlager, zweiachsig bewegliches Gleitteil, gem. DIN EN 1337-1 Nr.3.5		Stk	5.018,11 €	
			01-05-06	Kalottenlager, einachsig bewegliches Gleitteil, gem. DIN EN 1337-1 Nr.3.3 oder 3.4		Stk	5.487,71 €	
			01-05-07	Lagereinbau überwachen		Stk	133,66 €	

**Abbildung 8-5: Standardraum Lager**

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
118								0,00 €
123					Menge	ME	EP	GP
				<b>Kappen abbrechen</b>				
118	Kappe	Kappe	01-06-01	Schrammbord aus Granitbordstein Form A, gerade mit Anlauf, 180/120mm, auf Reaktionsharzbeton, Verankerung in Kappenbeton, gem. RIZ-ING Kap12		m	76,67 €	
			01-06-02	Kappe, Stahlbeton C25/30 WA + LP, mit Sichtflächenschalung, mit Besenstrich		m³	458,78 €	
			01-06-03	Bewehrung Kappen B500B		t	965,05 €	
			01-06-04	Verankerung Mittelkappen an Fahrbahnübergängen, Telleranker, gem. RIZ-ING Kap14		Stk	102,84 €	
				<b>Fugen</b>				
123	Kappe	Fugen	01-06-05	Fuge in Kappen auf Kammerwand, Bewehrung unterbrechen, inkl. Fugeneinlage und Fugenabschlussband, gem. RIZ-ING Fug3		m	95,04 €	
			01-06-06	Dichtungsabschlussband aus Elastomer, tieferliegendes Kragarmende unter Kappe, b=45cm, gem. ABD-N Detail FugArt3		m	43,73 €	
			01-06-07	Fugenabdeckung zw. Mittelkappen, Fugenband aus Elastomer, gem. RIZ-ING Fug6		m	160,13 €	
			01-06-08	Fugenabdeckung zw. Mittelkappen bei Fahrbahnübergang, Blechabdeckung, gem. ABD-N Detail Fug7		m	233,68 €	

**Abbildung 8-6: Standardraum Kappe**

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
113								0,00 €
123					Menge	ME	EP	GP
				<b>Fahrbahn</b>				
113	Fahrbahnbelag	Fahrbahn	01-07-01	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt SMA8S, d=3,5-4cm		m²	11,30 €	
			01-07-02	Abstumpfen der Deckschicht, Abstreumaterial bitumenumhüllte Lieferkörnung 1/3, maschinell aufbringen		m²	0,29 €	
			01-07-03	Schutzschicht aus Gussasphalt MA11S, d= 4cm, Einbau maschinell		m²	24,74 €	
			01-07-04	Abstreuerung der Schutzschicht		m²	1,21 €	
			01-07-05	Entwässerungsrinne aus Gussasphalt MA8S, b=30cm		m	36,78 €	
			01-07-06	Randstreifen aus Gussasphalt MA8S, b=20cm		m	20,97 €	
			01-07-07	Anschlussfuge an Kappen, Deck- und Schutzschicht, Fugenmasse Typ N2		m	12,83 €	
			01-07-08	Anschlussfuge an Fahrbahnübergang, Deck-/Schutzschicht, Fugenmasse Typ N2		m	8,35 €	
			01-07-09	Anschlussfuge an Entwässerungsrinne/Randstreifen, Deckschicht, Fugenmasse Typ N2		m	6,39 €	
			01-07-10	Anschluss an bestehende Fahrbahndecken, Querfuge, mit anschmelzbarem Fugenband		m	5,56 €	
			01-07-11	Asphalt fräsen		m²	11,63 €	
			01-07-12	Gebundenen Oberbau aufbrechen		m²	41,42 €	
				<b>Abdichtung</b>				
123	Fahrbahnbelag	Abdichtung	01-07-13	Betonoberfläche im Abdichtungsbereich strahlen, Kugelstrahlen, inkl. Reinigen		m²	12,11 €	
			01-07-14	Kratzspachtelung im Abdichtungsbereich herstellen		m²	9,65 €	
			01-07-15	Kratzspachtelmasse aus Reaktionsharzmörtel liefern		m²	3,69 €	
			01-07-17	Dichtungsschicht, Polymerbitumen-Schweißbahn ohne Metallkaschierung mit hochliegender Trägereinlage, inkl. Dichtungsanschluss an Einbauteile		m²	11,45 €	
			01-07-18	Verstärkungstreifen im Schrammbordbereich, b=30cm, edelstahlkaschierte Bitumenschweißbahn		m	12,24 €	
			01-07-19	Schutzlage unter Kappen, Glasvlies-Bitumendachbahn V13		m²	7,59 €	
			01-07-20	Fugenband herstellen. Zwischen Widerlager und Kammerwand.		m	59,17 €	
01-07-21	Fugenband herstellen. Zwischen Überbau und Kammerwand		m	79,54 €				

**Abbildung 8-7: Standardraum Fahrbahnbelag**



## Anhang A – Standardräume Brücke

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
121								0,00 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Fahrbahnübergang</b>				
121	Fahrbahnübergang	Einbau	01-08-01	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 1 Dichtprofil, gem. RIZ-ING Übe1		m	741,75 €	
			01-08-02	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 3 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1		m	5.880,78 €	
			01-08-03	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 4 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1		m	7.532,43 €	
			01-08-04	Fahrbahnübergang aus Stahl lamellen, mit 5 Dichtprofilen, gem. RIZ-ING Übe1		m	5.813,40 €	
			01-08-05	Geräuschmindernde Oberfläche für Fahrbahnübergang in Lamellenbauweise, ab 3 Dichtprofilen		m	1.481,15 €	

**Abbildung 8-8: Fahrbahnübergang**

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				
115								0,00 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Böschungstreppe und Pflaster</b>				
115	Böschungstreppe und Pflaster	Einbau	01-09-01	Böschungstreppe 80cm, Stufen aus Granitsteinen auf 10 cm konstruktiv bewehrtem Unterbeton, RIZ-ING Bösch1		m	305,67 €	
			01-09-02	Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (zw. Böschungstreppe und Flügelwand)		m <sup>2</sup>	99,90 €	
			01-09-03	Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (oberes Ende Böschungstreppe)		m <sup>2</sup>	115,31 €	
			01-09-04	Pflasterdecke aus Granitpflastersteinen (unten vor dem Widerlager)		m <sup>2</sup>	96,37 €	
			01-09-05	Granitbord (Anschluss an BW)		m	76,89 €	
			01-09-06	Granithochbord (Einfassung Pflaster oberes Ende Böschungstreppe)		m	65,14 €	

**Abbildung 8-9: Standardraum Böschungstreppe und Pflaster**

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					
121								0,00 €	
					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Schutzeinrichtung Beton</b>					
121	Ausstattung Kappen	Schutzeinrichtung Beton	01-11-01	Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen C30/37, H2 - W4, Außenkappen		m	210,26 €		
			01-11-02	Schutzeinrichtung aus Betonfertigteilen C30/37, H2 - W2, Mittelkappen		m	212,45 €		
					<b>Geländer/ Schutzeinrichtung</b>				
		Geländer/ Schutzeinrichtung	01-11-03	Stahlgeländer, feuerverzinkt, H=110cm, Füllstabgeländer, Handlauf mit Drahtseil, Verankerung mit Fußplatte und Verbundankern		m	176,60 €		
			01-11-04	Stahlgeländer, feuerverzinkt, H=110cm, Holmgeländer, Handlauf mit Drahtseil, Verankerung mit Fußplatte und Verbundankern		m	110,49 €		
			01-11-05	Korrosionsschutz Stahlgeländer, Sweepstrahlen, Zwischenbeschichtung EP, Deckbeschichtung PUR, Ausführung im Werk		m	26,27 €		
			01-11-06	Schutzeinrichtung herstellen. Konstruktion einfache Schutzplanke mit Pfosten Abstand 4m		m	115,70 €		
			01-11-07	AEK herstellen		Stk	474,56 €		
01-11-08	Übergangskonstruktion für Schutzeinrichtung aus Beton von SE-Brücke auf SE-Strecke herstellen			Stk	1.580,12 €				

**Abbildung 8-10: Standardraum Ausstattung Kappen**

## Anhang A – Standardräume Brücke

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP		
116								0,00 €		
				<b>Traggerüste</b>						
116	Gerüste	Unterbau	01-12-04	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	373,55 €			
			01-12-05	Arbeitsgerüst Widerlager		m <sup>2</sup>	139,31 €			
		Überbau	01-12-06	Schweres Traggerüst Überbau, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m <sup>3</sup>	-			
			01-12-07	Schweres Traggerüst Überbau, Mehrfeldbrücke		m <sup>3</sup>	7,87 €			
			01-12-08	Leichtes Traggerüst Überbau		m <sup>3</sup>	-			
		Kappen	01-12-09	Überbau absenken, mittels Pressen und Abstapelung		m <sup>2</sup>	-			
			01-12-10	Schweres Traggerüst Kappen		m	-			
			01-12-11	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	-			
			01-12-12	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	71,61 €			
					01-12-13	Verankerung Konsolgerüst		m	66,05 €	
						<b>Taktschiebeverfahren</b>				
		Unterbau	01-12-14	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	373,55 €			
			01-12-15	Arbeitsgerüst Widerlager		m <sup>2</sup>	139,31 €			
		Überbau	01-12-16	Fertigungs-, Vorfertigungs- und Verschiebeeinrichtung für die Herstellung der beiden Überbauten im Taktschiebeverfahren.		m <sup>2</sup>	67,13 €			
			01-12-17	Vorbauschnabel		m <sup>2</sup>	11,41 €			
		Kappen	01-12-19	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	292,96 €			
			01-12-20	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	71,61 €			
			01-12-21	Verankerung Konsolgerüst		m	66,05 €			
						<b>Vorschubrüstung</b>				
		Unterbau	01-12-22	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	373,55 €			
			01-12-23	Arbeitsgerüst Widerlager		m <sup>2</sup>	139,31 €			
Überbau	01-12-24	Vorschubgerüst nach statischen, konstruktiven und sicherheitstechnischen Erfordernissen liefern, herstellen, vorhalten, unterhalten, umsetzen, abbauen und abfahren.		m <sup>2</sup>	315,93 €					
Kappen	01-12-25	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	292,96 €					
	01-12-26	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	71,61 €					
	01-12-27	Verankerung Konsolgerüst		m	66,05 €					
				<b>Freivorbau</b>						
Unterbau	01-12-22	Arbeitsgerüst Pfeiler		m	-					
	01-12-23	Arbeitsgerüst Widerlager		m <sup>2</sup>	-					
Überbau	01-12-24	Gerüst für Freivorbau nach statischen, konstruktiven und sicherheitstechnischen Erfordernissen liefern, herstellen, vorhalten, unterhalten, umsetzen, abbauen und abfahren.		m <sup>2</sup>	-					
Kappen	01-12-25	Konsolgerüst für Kappen, Einfeld-/Zweifeldbrücke		m	-					
	01-12-26	Konsolgerüst für Kappen, Mehrfeldbrücke		m	-					
	01-12-27	Verankerung Konsolgerüst		m	-					

**Abbildung 8-11: Standardraum Gerüste**

## Anhang A – Standardräume Brücke

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP
111								0,00 €
				<b>Entwässerung Widerlager</b>				
		Entwässerung Widerlager	01-13-01	Grundrohr DN150, inkl. Austrittsrohre Edelstahl DN150		m	36,91 €	
			01-13-02	Auflagerbankentwässerung Rinne DN100, inkl. Austrittsrohre Edelstahl DN100 (gilt auch für Wartungsgangentwässerung)		m	70,49 €	
			01-13-03	Dränschicht Was 7		m³	9,47 €	
				<b>Entwässerung Pfeiler</b>				
		Entwässerung Pfeiler	01-13-04	Pfeilerkopftentwässerung Rinne DN100, inkl. Edelstahlrohr DNN100 als Anschluss zur Sammelleitung		m	131,57 €	
			01-13-05	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN150 / Fallrohr		Stk	184,50 €	
			01-13-06	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN200 / Fallrohr		Stk	307,38 €	
			01-13-07	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN250 / Fallrohr		Stk	430,43 €	
			01-13-08	Elastomer-Rohrverbindung Sammelleitung DN300 / Fallrohr		Stk	875,52 €	
			01-13-09	Fallrohr, aus nichtrostendem Stahl, DN300		m	570,87 €	
			01-13-10	Energievernichtungsschacht 1,50x1,50m, Stahlbetonfertigteile C35/45, inkl. Schachtabdeckung		Stk	5.527,08 €	
				<b>Entwässerung Überbau</b>				
		Entwässerung Überbau	01-13-11	Tropftülen, inkl. Lochblech und Sickerschicht, gem. RIZ-ING Was11		Stk	128,35 €	
			01-13-12	Brückenablauf 300x500, Abgang DN150, Schlammweimer aus Stahlblech, feuerverzinkt, gem. RIZ-ING Was1		Stk	488,67 €	
			01-13-13	Anschlussleitung von Brückenablauf an Sammelleitung, einschl. Formstücken, muffenlos, einschl. Anschlüsse u. Befestigungen, DN 150, Rohr aus glaserverstärktem Kunststoff (GFK)		m	172,97 €	
			01-13-14	Rohrleitung für BW Entwässerung DN 200 Sammelleitung		m	231,37 €	
			01-13-15	Rohrdurchführung DN 150		Stk	257,81 €	
			01-13-16	Entwässerungs- und Belüftungsöffnungen Hohlkasten in Boden, DN150 mit Vogelschutzgitter, RIZ-ING Was17		Stk	57,42 €	
			01-13-17	Entwässerungs- und Belüftungsöffnungen Hohlkasten in Steg, DN150 mit Vogelschutzgitter, RIZ-ING Was17		Stk	60,85 €	

**Abbildung 8-12: Standardraum Entwässerung**

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP
124								0,00 €
116								
				<b>Betoninstandsetzung</b>				
		Betoninstandsetzung	01-14-01	Beton flächig abtragen. Beton druckwasserstrahlen		m²	80,95 €	
			01-14-02	Beton vorbereiten für Teilersatz mittels Druckluft mit festen Starhmitteln strahlen		m²	7,90 €	
			01-14-03	Halbbrücke auf vorbereiteter Betonunterlage aus Zementmörtel		m²	6,88 €	
			01-14-04	Instandsetzung mit PCC (kunststoffmodifizierter Zementmörtel) herstellen. Einbaudicke 2-6 cm		m²	195,40 €	
				<b>Betonstahl</b>				
		Betonstahl	01-14-05	Betonstahl vorbereiten DN 12 bis 16 mm		m	5,42 €	
			01-14-06	Beschichtung Betonstahl Zementleim mit Kunststoffzusatz und zusätzlichem Korrosionsschutz		m	13,22 €	
				<b>Risse</b>				
		Risse	01-14-07	Risse vorbereiten für Epoxidharz		m	5,55 €	
			01-14-08	Tränkung der Risse mit Epoxidharz		m	9,45 €	
			01-14-09	Epoxidharz liefern		m	18,91 €	
			01-14-10	Risse nachbehandeln durch Abschleifen		m	10,08 €	
				<b>Lager</b>				
		Lager	01-14-11	Lager ausbauen		Stk	2.115,64 €	
			01-14-12	Überbau anheben und absenken. Pressenansatz auf Auflagerbank.		psch	7.329,56 €	
				<b>Kappen</b>				
		Kappen	01-14-13	Kappen abbrechen		m³	187,60 €	
				<b>Fahrbahn/ Abdichtung</b>				
		Fahrbahn/ Abdichtung	01-14-14	Abdichtung abbrechen		m²	10,51 €	
			01-14-15	Asphaltoberbau trennen		m	7,19 €	
			01-14-16	Deck- und Zwischenschicht abtragen		m	4,86 €	
			01-14-17	Asphalt fräsen		m²	11,63 €	
			01-14-18	Gebundenen Oberbau aufbrechen		m²	41,42 €	
				<b>Fahrbahnübergang</b>				
		Fahrbahnübergang	01-14-19	Fahrbahnübergang ausbauen		Stk	2.256,10 €	
				<b>Ausstattung Kappen</b>				
		Ausstattung Kappen	01-14-20	Geländer ausbauen		m	4,89 €	
			01-14-21	Bordsteine ausbauen		m	17,18 €	
			01-14-22	SE abbauen		m	2,20 €	
			01-14-23	AEK abbauen		st	11,91 €	
			01-14-24	Übergangskonstruktion für Schutzeinrichtung aus Beton von SE-Brücke auf SE-Strecke abbauen		St	33,06 €	
				<b>Entwässerung</b>				
		Entwässerung	01-14-25	Brückenablauf ausbauen		Stk	196,01 €	
			01-14-26	Entwässerungsleitung ausbauen		m	21,05 €	
			01-14-27	Tropftülle ausbauen		Stk	77,53 €	
			13-19	Betonfertigteilschacht ausbauen		Stk	993,40 €	
				<b>Instandsetzung</b>				
116	Traggerüste	Instandsetzung	01-14-28	Trag- Arbeits und Schutzgerüst Kappen		m	555,84 €	
			01-14-29	Trag- Arbeits und Schutzgerüst Brückenunterseite		m	408,12 €	
			01-14-30	Verankerung für Gesimskonsolen für Kappenschalung herstellen		m	65,97 €	

**Abbildung 8-13: Standardraum Instandsetzung**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	Formel	ME	EP	GP	0,00 €		
117												
				<b>Flachgründung</b>								
117	Gründung	Flachgründung	02-01-01	Sauberkeitsschicht C8/10 unter Fundamente herstellen			m <sup>2</sup>	12,62 €				
			02-01-02	Ausgleich Unebenheiten von Baugrubensohlen			m <sup>3</sup>	96,60 €				
			02-01-03	Fundament aus Stahlbeton herstellen C 30/37			m <sup>3</sup>	218,89 €				
			02-01-04	Bewehrung Betonstahl für Fundamente BSt 500S			m <sup>3</sup>	973,48 €				
					<b>Tiefgründung/ Pfahlgründung</b>							
		Tiefgründung	02-01-05	Pfahlgründung aus Ortbetonbohrpfählen, bewehrt			m	975,48 €				
			02-01-06	Pfahlköpfe abarbeiten			Stk	976,48 €				
						<b>Bewehrung</b>						
			02-01-07	Betonstahlbewehrung			t	978,48 €				
			02-01-08	Bewehrungskörbe verlängern			Stk	979,48 €				
			02-01-09	Bewehrung, Betonstahl, Bauteil: Pfahlkopfplatten			t	980,48 €				
02-01-10	Leerrammung bzw. Leerbohrung über 1 m je Pfahl für Ortbetonbohrpfähle				Stk	981,48 €						
			<b>Pfahlkopfplatten</b>									
02-01-11	Pfahlkopfplatten aus Stahlbeton herstellen			m <sup>3</sup>	983,48 €							

Abbildung 8-14: Standardraum Gründung

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	Formel	ME	EP	GP	0,00 €
117										
				<b>Spundwand</b>						
117	Baugrubenverbau	Spundwand	02-02-01	Baugrubenumschließung als Stahlspundwand einschl. Gurtungen, Aussteifungen und/oder Verankerungen sowie ggf. erforderlicher Eck-, Pass- und Keilbohlen entsprechend statischen und konstruktiven Erfordernissen herstellen, vorhalten, ausbauen und von der Baustelle entfernen.			m <sup>2</sup>	125,36 €		
			02-02-02	Geräte für die Herstellung von Stahlspundwänden einsetzen. Der Geräteeinsatz umfasst das Anfahren, das Aufstellen und ggf. Umsetzen im angegebenen Bereich sowie das Abbauen und Abfahren.			Stk	8.640,84 €		

Abbildung 8-15: Standardraum Baugrubenverbau

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	Formel	ME	EP	GP	0,00 €	
125											
				<b>Innenschale</b>							
125	geschlossene Bauweise	Innenschale	02-03-01	Innenschale mit Sohlgewölbe aus Stahlbeton. Sohlgewölbe gesondert. Dicke 40 cm			m <sup>3</sup>	597,97 €			
			02-03-02	Sohlgewölbe für Tunnel aus Stahlbeton herstellen. Dicke= 50 cm			t	219,48 €			
						<b>Bewehrung</b>					
			02-03-03	Bewehrung Bauteil: Gewölbe			m <sup>3</sup>	1.275,74 €			
		02-03-04	Bewehrung Bauteil: Sohlgewölbe			t	1.883,52 €				
					<b>Ausbruch</b>						
		Ausbruch	02-03-05	Tunnelanschlag durch die vorhandene Baugrubensicherung hindurch nach Unterlagen des AG herstellen.			psch				
			02-03-06	Tunneldurchschlag durch die vorhandene Baugrubensicherung hindurch nach Unterlagen des AG herstellen			psch				
			02-03-07	Ausbruch Vkl. 4 - 7 Kalotte			m <sup>3</sup>	50,72 €			
02-03-08	Ausbruch Vkl. 4 - 7 Strosse				m <sup>3</sup>	35,06 €					
02-03-09	Ausbruch Vkl. 4 - 7 Sohlgewölbe				m <sup>3</sup>	40,14 €					

Abbildung 8-16: Standardraum geschlossene Bauweise

## Anhang B – Standardräume Tunnel

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					0,00 €
106									
					Menge	Formel	ME	EP	GP
106	Erdaushub		02-04-01	Oberboden abtragen			m²	2,67 €	
			02-04-02	Boden profilgerecht oder nach Unterlagen des AG lösen, laden, fördern, ggf. einbauen und verdichten. Boden der Klassen 3 bis 5.			m³	3,51 €	
			02-04-03	Arbeitsraumverfüllung herstellen			m³	4,08 €	

**Abbildung 8-17: Standardraum Erdaushub**

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					0,00 €
125									
					Menge	Formel	ME	EP	GP
				<b>Rahmenbauwerk</b>					
125	offene Bauweise	Rahmenbauwerk	02-05-01	Aufgehende Rahmentragwerke für Tunnel mit polygonalem Profil in offener Bauweise aus Stahlbeton mit Schalung einschließlich ggf. erforderlicher Aussparungen und Nischen nach Unterlagen des AG herstellen			m³	153,79 €	
			02-05-02	Bewehrung Rahmenbauwerk BSt 500S			t	889,08 €	
				<b>Bodenplatte</b>					
		Bodenplatte	02-05-03	Stahlbeton, Bewehrung gesondert			m³	200,48 €	
				Bewehrung BSt 500S			t	773,84 €	

**Abbildung 8-18: Standardraum offene Bauweise**

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung					0,00 €
445									
					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Tunnelleuchten</b>					
			02-06-01	Tunnelleuchte 400W MK,2stufig (Einsichtsstrecke)		Stk	501,08 €		
			02-06-02	Tunnelleuchte 150W MK,2stufig (Übergangsstrecke)		Stk	505,63 €		
				<b>Leuchtmittel</b>					
			02-06-03	NAH 400 W		Stk	19,30 €		
			02-06-04	NAH 150 W		Stk	14,98 €		
				<b>Sonstiges</b>					
			02-06-05	Resopalschild		Stk	9,98 €		
			02-06-06	Einzel-Leuchtenbefestigung NAH		Stk	72,95 €		
				<b>Tunnelleuchten</b>					
			02-06-07	Tunnelleuchte NAH 2 x 70 W		Stk	636,93 €		
				<b>Leuchtmittel</b>					
			02-06-08	NAH 70		Stk	9,90 €		
				<b>Sonstiges</b>					
			02-06-09	Resopalschild		Stk	9,98 €		
			02-06-11	Einzel- Leuchtenbefestigung NAH		Stk	72,95 €		
			02-06-13	Leuchtenreinigung nach Fertigstellung		Stk	3,81 €		
			02-06-15	Inbetriebnahme Beleuchtungsanlage		Stk	6,98 €		
				<b>Messtechnik</b>					
			02-06-16	LI-Sensor LWL (aussen) in der Annäherungsstrecke		Stk	2.971,13 €		
			02-06-17	LI-Sensor (Innen) in der Einsichtsstrecke		Stk	2.737,21 €		
			02-06-18	LI-Sensor (Durchfahrt) in der Innenstrecke		Stk	2.696,42 €		
			02-06-19	Tag/Nacht-Sensor		Stk	1.774,37 €		
			02-06-20	Wandhalterung Edelstahl [Stck] Wandausleger aus Werkstoffen der Anforderungsklasse I, liefern zur Montage von: - 1 Leuchtdichtkamera		Stk	283,41 €		
			02-06-21	Befestigungskonsolle außen [Stck] für Außen-Leuchtdichtkamera und Beleuchtungsstärkesensor		Stk	333,64 €		

**Abbildung 8-19: Standardraum Beleuchtung**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €
431									
				<b>Strahlventilatoren</b>					
			02-07-01	Strahlventilator		Stk	10.067,92 €		
			02-07-02	Antriebsmotor SV		Stk	3.860,71 €		
			02-07-03	Digitaler Sanftanlauf		Stk	1.011,39 €		
			02-07-04	Frequenzrichter Strahlventilator		Stk	5.192,65 €		
			02-07-05	(Abreiß)Kontaktschalter SV		Stk	101,45 €		
			02-07-06	Schwingungssensor SV		Stk	369,62 €		
			02-07-07	Hebe- und Arbeitsbühne		Stk	1.588,11 €		
			02-07-08	Kontrollen und Prüfungen, Typentest, SV-Antrieb		Stk	2.075,27 €		
			02-07-09	Typenzulassung SV		psch	486,00 €		
			02-07-10	Werksprüfung SV/ Werksabnahme		psch	4.122,13 €		
			02-07-12	Überprüfung SV im Tunnel €/Ventilator		Stk	1.241,36 €		
			02-07-13	Messungen im Tunnel		psch	2.802,70 €		
			02-07-14	Prüfung der Steuervorgaben		psch	2.193,17 €		
			02-07-15	Inbetriebnahme €/Ventilator		psch	468,06 €		
				<b>Axialventilatoren für Absaugung</b>					
			02-07-16	Axialventilator Abluftventilator		Stk	123.088,77 €		
			02-07-17	Antriebsmotor Axialventilator		Stk	66.170,75 €		
			02-07-18	Frequenzrichter Axialventilator		Stk	44.904,19 €		
			02-07-19	Axialventilator Schalldämpfer (Saugseite)		Stk	152.888,32 €		
			02-07-20	Axialventilator Schalldämpfer (Druckseite)		Stk	152.888,32 €		
			02-07-21	Absperrklappe Axialventilator		Stk	30.125,65 €		
			02-07-22	Montageeinrichtung		psch	2.818,26 €		
			02-07-23	Lieferung		psch	8.739,56 €		
			02-07-24	Montage		psch	74.517,84 €		
			02-07-25	Inbetriebsetzung		psch	10.234,98 €		
				<b>Messtechnik</b>					
				<b>Sichttrübenmesswerterfassung</b>					
			02-07-26	Messsensor Si, Sesnsorpaar		Stk	6.840,78 €		
			02-07-27	Elektr. Anzeigegerät		Stk	208,98 €		
				<b>Strömungsmesswerterfassung</b>					
			02-07-28	Strömungsmessgerät		Stk	6.294,58 €		
			02-07-29	Auswerteeinheit Strömungsmessung		Stk	2.133,81 €		
			02-07-30	Anschlusskasten IP 65		Stk	148,68 €		
			02-07-31	Elektr. Anzeigegerät		Stk	178,45 €		
				<b>CO Messwerterfassung</b>					
			02-07-32	CO-Sensor		Stk	1.700,50 €		
			02-07-33	Elektr. Anzeigegerät		Stk	191,17 €		
				<b>Kalt- Rauchmesswerterfassung</b>					
			02-07-34	Kaltrauch Messensor		Stk	6.868,64 €		
			02-07-35	Elektr. Anzeigegerät		Stk	194,58 €		
			02-07-36	Temperatur- und Feuchtemessung im Tunnel		Stk	1.552,04 €		
			02-07-37	Temperaturmessgerät Portal/ Tunnelvorfeld		Stk	849,63 €		
			02-07-38	Elektr. Anzeigegerät		Stk	234,88 €		
				<b>Klappen</b>					
			02-07-39	Rauchabzugsklappe		Stk	11.172,85 €		
			02-07-40	Einbaurahmen		Stk	2.390,41 €		
			02-07-41	Antriebsmotor für Rauchabzugsklappe		Stk	4.265,83 €		
			02-07-42	Wärmeschutzhaube		Stk	2.248,16 €		
			02-07-44	Hebeeinrichtung/ mobiler Kran		psch	2.524,53 €		
				<b>Schalldämpfer</b>					
			02-07-45	Schalldämpfer		Stk	109.879,36 €		
			02-07-46	Montageeinrichtung		psch	761,74 €		
			02-07-47	Lieferung		psch	1.904,35 €		
			02-07-48	Montage		psch	3.808,71 €		

**Abbildung 8-20: Standardraum Belüftung**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €
				<b>Mindestausstattung</b>					
			02-08-01	Wechsellichtzeichen rot/gelb Portal zur Sperrung	Stk		531,87 €		
			02-08-02	Verkehrszeichen VZ 327 StVO (Tunnel)	Stk		569,59 €		
			02-08-03	Verkehrszeichen VZ 274-68 StVO Geschwindigkeitsbegrenzung	Stk		660,53 €		
			02-08-04	Verkehrszeichen VZ 277 StVO bei RV Tunneln Überholverbot für LKW	Stk		116,51 €		
			02-08-05	Verkehrszeichen VZ 282 StVO (Ende der Streckenverbote)	Stk		127,14 €		
			02-08-06	Gefahrenzeichen Lichtzeichenanlage Z 131 StVO mit gelben Blinklicht	Stk		139,73 €		
			02-08-07	Überholverbot Z 276 StVO (allgemeines Überholverbot) (LED WVZ)	Stk		2.049,00 €		
			02-08-08	Höhenangabe Z 265 StVO	Stk		165,42 €		
			02-08-09	Wechselverkehrszeichen Z 250 StVO	Stk		4.412,80 €		
				<b>Befestigungskonstruktionen</b>					
			02-08-10	Rohrpfosten, 1 Blechschild	Stk		561,58 €		
			02-08-11	Mast Wechsellichtzeichen	Stk		997,73 €		
			02-08-12	Mast Wechselverkehrszeichen	Stk		443,36 €		
			02-08-13	Mastfundament für WVZ-Standmast	Stk		694,79 €		
				<b>Grundausrüstung</b>					
			02-08-14	Mindestausstattung	Stk		<b>0,00 €</b>		
			02-08-15	WVZ Typ A, Größenklasse C LED für Geschwindigkeitsdrosselung vor Tunnel	Stk		3.797,10 €		
			02-08-16	WVZ Typ B, Größenklasse D LED (alle 600 m wiederholen) Strecke	Stk		4.688,77 €		
			02-08-17	Hinweiszeichen Radio einschalten	Stk		88,81 €		
			02-08-18	LED-VZ 328 "Nothaltebucht"	Stk		346,65 €		
				<b>Befestigungskonstruktionen</b>					
			02-08-19	Mast Wechselverkehrszeichen	Stk		443,36 €		
			02-08-20	Mastfundament für WVZ-Standmast	Stk		694,79 €		
			02-08-21	Befestigungskonstruktion WVZ	Stk		325,99 €		
			02-08-22	Wandkonsole Verkehrszeichen	Stk		344,04 €		
				<b>Erweiterte Ausstattung</b>					
			02-08-23	Grundausrüstung	Stk		10.729,53 €		
			02-08-24	WVZ Typ A, Größenklasse D LED, Strecke, alle 300 - 600 m	Stk		4.157,94 €		
			02-08-25	WVZ DLZ Tunnel	Stk		3.860,37 €		
			02-08-27	Prismenw. (Typ 1) horizontal 3-Kant	Stk		6.398,18 €		
			02-08-28	Prismenw. (Typ 2) horizontal 3-Kant	Stk		9.158,00 €		
				<b>Befestigungskonstruktionen</b>					
			02-08-29	Befestigungskonstruktion WVZ Typ A an Mast/ Verkehrszeichenbrücke	Stk		325,99 €		
			02-08-30	Mastfundament für WVZ Standmast	Stk		694,79 €		
			02-08-32	Wandkonsole Verkehrszeichen	Stk		344,04 €		
			02-08-33	Mast Prismenwender	Stk		443,36 €		
				<b>Schranken</b>					
			02-08-34	LSA- Signalgeber 2-feld, 300 mm LED	Stk		430,47 €		
			02-08-35	Signalmast/ Standmast	Stk		768,69 €		
			02-08-36	Mastfundament für LSA-Standmast	Stk		419,60 €		
			02-08-37	Erdungsmaterialien LSA u. Schranke (psch)	Stk		3.146,98 €		
			02-08-38	Schrankenanlage	Stk		9.738,44 €		
			02-08-39	Gelbe Blinkleuchte LED	Stk		323,10 €		
			02-08-40	Schrankenbaum 4-6 m	Stk		1.594,04 €		
			02-08-41	Endlagepfosten	Stk		307,51 €		
			02-08-42	induktivschleifen Schwenkbereich	Stk		855,49 €		
			02-08-43	Fundament Schranke	Stk		1.103,07 €		
			02-08-44	Fundament Endlagepfosten	Stk		421,22 €		
				<b>Verkehrsdatenerfassung</b>					
			02-08-45	Doppelinduktivschleife Typ 2 TLS	Stk		862,48 €		
			02-08-47	Doppelschleifendetektor	Stk		499,47 €		
			02-08-48	Datenerfassung und aufbereitung	Stk		2.149,51 €		
			02-08-49	Verbindungsmuffen	Stk		59,40 €		
			02-08-50	Anschlusskasten Detektorschleife	Stk		98,57 €		
				<b>Höhenkontroll-einrichtung</b>					
			02-08-51	Einweglichtschranke	Stk		1.989,03 €		
			02-08-52	Doppellichtschrankensteuerung	Stk		561,00 €		
			02-08-53	Doppelschleifendetektor	Stk		470,02 €		
			02-08-54	Rohrmast Höhenkontrolle	Stk		2.287,78 €		
				<b>Streckenstationen</b>					
			02-08-55	Außenverteiler SST	Stk		4.076,11 €		
			02-08-56	Außenverteiler für PBF und ASP (oder im Tunnel für WVZ etc)	Stk		5.541,17 €		
			02-08-57	Betonsockel 800 x 600	Stk		838,09 €		
			02-08-58	Betonsockel 2100 x 600	Stk		1.219,22 €		
			02-08-59	Polzeibedienfeld	Stk		1.899,60 €		
			02-08-60	Handbedienfeld (Wartung)	Stk		1.859,28 €		
			02-08-61	Energieteil 950 V für SST	Stk		3.449,14 €		
			02-08-62	Energieteil 400 V für SST	Stk		2.751,81 €		
			02-08-63	Elektron. Sicherung 24 V, 4 Kanal	Stk		227,10 €		
			02-08-64	Elektron. Sicherung 24 V, 8 Kanal	Stk		576,39 €		
			02-08-65	Primärschaltregler	Stk		190,80 €		
			02-08-66	Redundanzmodul	Stk		137,19 €		
			02-08-67	Steuerkabelung zwischen der Streckenstation	Stk		451,68 €		
			02-08-68	Potentialausgleichsschienen	Stk		86,73 €		
			02-08-69	LWL- Verteilungszubehör	Stk		928,69 €		
			02-08-70	19" Baugruppenträger	Stk		956,36 €		

Abbildung 8-21: Standardraum Verkehrsanlagen

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €		
456											
				<b>Notrufstation</b>							
456	Notruf Station	Notrufstation	02-09-01	Verblendung Notrufstation als Betonfertigteile mit F90 Türen inkl. Feuerlöschkasten		Stk	12.141,76 €				
			02-09-02	Abdeckkonstruktion Kabelkeller in Notrufstation/ Doppelboden		Stk	2.423,53 €				
			02-09-03	Verteiler in Notrufstation, freistehender Schaltschrank. Felderausbau siehe Niederspannungsanlagen		Stk	3.651,16 €				
						<b>Stationenausbau</b>					
				Stationenausbau	02-09-04	Türkontaktschalter Feuer/ Verteiler		Stk	86,98 €		
					02-09-05	Türkontaktschalter Stationentür		Stk	87,42 €		
					02-09-06	Näherungsschalter Feuerlöscher		Stk	110,06 €		
					02-09-07	LED Hinweisleuchte Notrufstation		Stk	739,79 €		
					02-09-08	Rundumleuchte gelb		Stk	139,25 €		
					02-09-09	Resopalschild Nischenverkleidung		Stk	103,49 €		
					02-09-10	Resopalschild Feuerlöscher		Stk	35,65 €		
					02-09-11	Resopalschild Kabine		Stk	75,70 €		
					02-09-12	Resopalschild Nummer		Stk	54,51 €		
				02-09-13	LED Feuchtraumwannenleuchte		Stk	165,18 €			
						<b>Notrufsystem</b>					
				Notrufsystem	02-09-14	Notrufsäule ANE2000 (Tunnelportale)		Stk	3.383,73 €		
					02-09-15	Trennverschluss Säule		Stk	1.275,72 €		
					02-09-16	ANE 2000 als Wandgerät (Nische)		Stk	3.124,87 €		
					02-09-17	Trennverschluss Nische		Stk	1.504,38 €		
					02-09-18	Anschlussgehäuse Wand Notrufmelder		Stk	1.960,39 €		
					02-09-19	Anschlusskabel für ANE 2000		Stk	339,54 €		
		02-09-20	Fundament Notrufsäule			Stk	1.703,21 €				
		02-09-21	Notrufmelder für behinderte Personen			Stk	518,44 €				

**Abbildung 8-22: Standardraum Notrufstation**



## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €		
451	Videoüberwachung	Kameras	<b>Kameras im Vorfeld</b>								
			02-10-01	IR Scheinwerfer		Stk	1.039,39 €				
			02-10-02	Tag Nacht Kamera		Stk	285,19 €				
			02-10-03	Objektiv für SNZ Außenkamera		Stk	1.338,66 €				
			02-10-04	Kameragehäuse für SNZ Außenkamera		Stk	2.702,42 €				
			02-10-05	Hochgeschwindigkeits SN Kopf		Stk	7.524,85 €				
			02-10-06	Mast Adapter für SN Kopf		Stk	702,12 €				
			02-10-07	Kameraanschlusskasten Außen		Stk	695,50 €				
			02-10-08	LWL Sender für SNZ Außenkamera		Stk	330,42 €				
			<b>Kameras im Tunnel</b>								
			02-10-09	Farb CCD Kamera		Stk	465,09 €				
			02-10-10	Objektiv für Tunnelkamera		Stk	121,87 €				
			02-10-11	Kameragehäuse für Tunnelkamera		Stk	491,75 €				
			02-10-12	Kamerahalter für Tunnelkamera		Stk	179,66 €				
			02-10-13	Kameraanschlusskasten 1 Kamera		Stk	650,82 €				
			02-10-16	LWL Sender für Anschlusskasten		Stk	333,86 €				
		<b>Einbauteile Schaltschränke</b>									
		02-10-17 19" Geräteträger für LWL Empfänger				Stk	595,58 €				
		02-10-18 LWL Empfänger				Stk	350,31 €				
		02-10-19 19" Geräteträger mit Dsub Stecker				Stk	101,49 €				
		02-10-20 19" Geräteträger VV Verstärker				Stk	260,20 €				
		02-10-21 Videoverteilerverstärker				Stk	96,46 €				
		02-10-22 Koaxverkabelung LWL Umsetzer				Stk	29,48 €				
		02-10-23 Koaxverkabelung Videoverteilerverstärker				Stk	31,35 €				
		02-10-24 19" Lüfterblenden				Stk	18,18 €				
		02-10-25 19" Hybridrekorder				Stk	6.084,92 €				
		02-10-26 Webzugriff Hybrid-Rekorder				Stk	413,23 €				
		02-10-27 19" Hybridrekorder IP				Stk	5.697,25 €				
		02-10-28 RS 232/422/485 IP-Wandler				Stk	567,98 €				
		02-10-29 Rack Konsole				Stk	1.014,00 €				
		02-10-30 19" Blindblenden HE				Stk	17,31 €				
		02-10-31 Video-Decoder MPEG 4				Stk	656,68 €				
		02-10-32 Kamera-Bedienteil				Stk	1.281,92 €				
		02-10-33 19" Bedienstation für Video				Stk	4.162,18 €				
		02-10-34 24" LED-Display Breitbild LED Flachbildschirm				Stk	394,39 €				
		02-10-35 Wandkonsole für 24" Monitor				Stk	76,03 €				
		02-10-36 19" Farb-Video-Monitor				Stk	447,73 €				
		02-10-37 Wandkonsole für Monitore				Stk	62,95 €				
		02-10-38 Überspannungsges. Steckdosenleiste				Stk	96,01 €				
		02-10-39 KVM-Verlängerung				Stk	1.224,36 €				
		02-10-40 Videomanagement Software				Stk	3.781,41 €				
		02-10-41 Anbindung an die ZLT				Stk	4.226,66 €				
		02-10-42 Software Fernparametrierung				Stk	317,86 €				
		02-10-43 Kompl. Steuerverkabelung BZ West				Stk	1.621,76 €				
		02-10-44 Kompl. Steuerverkabelung BZ Ost				Stk	1.621,76 €				
		02-10-45 Videobildausw. Rauch 1. BA				Stk	292,49 €				
		02-10-46 Videobildausw. Personen 1. BA				Stk	360,93 €				
		02-10-47 Videobildausw. stehendes FZ 1. BA				Stk	432,88 €				
		<b>Rettungsstollen</b>									
		02-10-48 Dome-Kamera im RS				Stk	517,89 €				
		02-10-49 Adapter für Mastmontage				Stk	71,45 €				
		02-10-50 Systemkabel 2m				Stk	70,17 €				
02-10-51 Kameraanschlusskasten Dome				Stk	438,36 €						
02-10-52 LWL-Sender Dome-Kamera				Stk	213,98 €						
		Einbauteile im Schaltschrank									
			Rettungsstollen								

Abbildung 8-23: Standardraum Videoüberwachung

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				0,00 €			
				<b>Lautsprecher</b>							
					<b>Menge</b>	<b>ME</b>	<b>EP</b>	<b>GP</b>			
				<b>Messung/ Gutachten</b>							
451	Lautsprecher	Messung/ Gutachten	02-11-01	Schalltechnisches Gutachten		psch	4.464,63 €				
			02-11-02	Zentraleinheit		Stk	14.978,68 €				
			02-11-03	Unterezentrale		Stk	10.740,94 €				
			02-11-09	Digitaler Ansagetextspeicher		Stk	1.582,20 €				
			02-11-10	Alarmierungssprachansagen		Stk	2.803,68 €				
			02-11-11	Leistungsverstärker 4x100 W		Stk	2.233,37 €				
			02-11-12	Havarieverstärker 4 x 100 W		Stk	2.498,41 €				
			02-11-13	Telefonüberleiteinrichtung		Stk	1.128,21 €				
			02-11-14	Basissprechstelle mit Tasten		Stk	1.326,27 €				
			02-11-15	Audio Codec Sprechstelle		Stk	950,57 €				
			02-11-16	Schnittstelle Verkehrsfunkanlage		psch	334,52 €				
			02-11-17	Anbindung an die ZLT		psch	1.883,17 €				
			02-11-18	Interface Einheit Sprechstelle		Stk	339,22 €				
							<b>Parametrierungen</b>				
					Parametrierung	02-11-19	Systemprogrammierung		psch	2.836,06 €	
						02-11-20	Param. Sprechstellen/ Ansagetext		psch	1.050,87 €	
						02-11-21	Param. Lautsprechersysteme		psch	2.613,34 €	
						02-11-23	Lizenzen		p	241,11 €	
				02-11-25		Wandlautsprecher		Stk	70,78 €		
						<b>Einrichtungen im Tunnel</b>					
				Einrichtungen	02-11-26	Grenzflächenhorn		Stk	1.835,53 €		
						<b>Einrichtungen im Rettungsstollen</b>					
					02-11-27	Druckkammerlautsprecher 30 W (RS)		Stk	232,50 €		
					02-11-28	Wandhalterung Lautsprecher		Stk	93,07 €		
					02-11-29	Rettungsstollen Lautsprecher (Grenzflächenhorn)		Stk	1.835,53 €		
						<b>Einrichtungen im Vorfeld</b>					
					02-11-30	Druckkammerlautsprecher 60 W		Stk	245,09 €		
		02-11-31	Sprechstelle Tunnelvorfeld			Stk	1.212,27 €				
		02-11-32	Masthalterung			Stk	236,45 €				

**Abbildung 8-24: Standardraum Lautsprecher**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktions- einheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €	
				<b>Brandmeldezentrale</b>						
456	Brandmeldeanlage	BMZ	02-12-01	automat. Brandmeldezentrale in Ring Bus Technik mit VdS Zulassung. Einbau in Schaltschrank		Stk	6.030,55 €			
				<b>Ausbau BMZ</b>						
		Ausbau BMZ	02-12-02	F30- Schaltschrank		Stk	2.406,90 €			
			02-12-03	Feuerwehrschlüsseldepot nach Vorgaben Feuerwehr		Stk	1.228,89 €			
			02-12-04	Schlüsseldepotanschaltung gemäß VdS		Stk	261,27 €			
			02-12-05	Freischaltelement mit Zylinder der zuständigen Feuerwehr		Stk	276,42 €			
			02-12-06	Freischaltelement Anschaltung		Stk	326,90 €			
			02-12-10	Feuerwehrinformati- und Bediensystem (FIBS)		Stk	1.723,05 €			
			02-12-11	Hauptmelder ISDN/GSM		Stk	790,93 €			
			02-12-12	Warntongeber akkustisch für Wandmontage		Stk	167,48 €			
			02-12-13	Warntongeber optisch für Wandmontage mit roter Blitzfarbe		Stk	155,00 €			
			02-12-14	Alarm Blitzleuchte, orange		Stk	99,71 €			
			02-12-15	Haltewinkel für Doppelboden		Stk	41,93 €			
			02-12-16	Feuerwehrlaufkarten		psch	1.093,07 €			
			02-12-17	Mehrfertigung Feuerwehrlaufkarte		psch	16,67 €			
			02-12-18	Feuerwehrpläne nach DIN 14 095 gemäß den Forderungen der zuständigen Feuerwehr erstellen		psch	2.562,48 €			
			02-12-19	Feuerwehr Gebäudefunk-Bedienfeld		Stk	251,77 €			
							<b>Brandmelder</b>			
			Brandmelder	02-12-20	Aufbau Druckknopfmelder IP 54		Stk	82,89 €		
							<b>Multisensormelder</b>			
		Multisensormelder	02-12-21	Multisensormelder		Stk	79,65 €			
						<b>RAS-System</b>				
		Rauchmelder	02-12-22	Rauchauslöseeinrichtung		Stk	611,84 €			
			02-12-23	Rauchansaugsystem		Stk	1.452,23 €			
			02-12-24	RAS Fühler-Rohrnetz Trafokammer BZ West		Stk	678,08 €			
						<b>Linienbrandmeldesystem</b>				
		Linienbrandmeldesystem	02-12-25	Brandmeldesystem Tunnel Bestehend aus: linienhafter Temperaturfühler, über die komplette Tunnellänge unter der Decke verlegt		psch	146.884,40 €			
			02-12-26	Visualisierungssoftware für das gesamte Brandmeldesysteme Tunnel zum Betrieb auf der Leittechnikanlage, inkl. allen erforderlichen Lizenzen		Stk	1.688,92 €			
						<b>Sonstiges</b>				
		Sonstiges	02-12-27	Schilder "Brandmeldezentrale"		Stk	1.576,06 €			
			02-12-28	Anbindung ZLT		psch	3.011,30 €			
				<b>Abnahme</b>						
Abnahme	02-12-29	Abstimmung und Koordinierung		psch	913,94 €					
	02-12-30	Abnahme Brandmeldeanlage		psch	2.652,75 €					
	02-12-31	Durchführung Brandversuch		psch	12.461,83 €					

Abbildung 8-25: Standardraum Brandmeldeanlage

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktions- einheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €
				<b>Löscheinrichtungen</b>					
				<b>Notrufstation im Tunnel, Querschlag und Vorfeld</b>					
474	Löscheinrichtungen	Tunnel, Querschlag und Vorfeld	02-13-01	Handfeuerlöscher ABC 6 kg		Stk	64,83 €		
			02-13-02	Halterung für Handfeuerlöscher		Stk	75,99 €		
					<b>Betriebszentrale</b>				
		Betriebszentrale	02-13-03	ABC Handfeuerlöscher 6 kg		Stk	57,07 €		
			02-13-04	CO2 Handfeuerlöscher 5 kg		Stk	120,30 €		
			02-13-05	CO2 Feuerlöscher 50 kg BZ Ost und West		Stk	1.246,35 €		
					<b>Betriebsräume in Querschlägen und Austrittsbauwerken</b>				
		Betriebsräume in Querschlägen und Austrittsbauwerken	02-13-06	ABC Handfeuerlöscher 6 kg		Stk	52,98 €		
			02-13-07	CO2 Handfeuerlöscher 5 kg		Stk	1.068,54 €		
			02-13-08	Halterung für Handfeuerlöscher		Stk	75,99 €		
02-13-09	Feuerlöscherschutzschrank			Stk	1.818,90 €				
02-13-10	Fundament FL Schutzschrank			Stk	795,92 €				

Abbildung 8-26: Standardraum Löscheinrichtungen

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktions-einheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				0,00 €		
					Menge	ME	EP	GP		
445	Fluchweg- und Orientierungsbeleuchtung	Fluchwegbeleuchtung	<b>Fluchweg- und Orientierungsbeleuchtung</b>							
			02-14-01	Fluchweghinweis- und Orientierungsbeleuchtung nach RABT 2006; Fluchwegkennzeichnung mit Entfernungsangaben; Orientierungsleuchte zur Beleuchtung Notgehwege			Stk	605,54 €		
			02-14-02	Leuchtenrevision			Stk	401,75 €		
			02-14-03	Umlaufende Fluchttürbeleuchtung gemäß Richtzeichnung			Stk	2.810,39 €		
			02-14-04	Wand Notausgang streichen			Stk	291,64 €		
			02-14-05	LED Hinweisleuchte Notrufstation (auch bei NRK)			Stk	458,06 €		
			02-14-06	Rundumleuchte gelb (bei NRK)			Stk	110,93 €		
			02-14-07	Fluchweghinweisleuchte Tunnel			Stk	706,73 €		
			02-14-08	Blitzleuchte klar zur Befestigung unten an der Fluchtwegleuchte			Stk	126,46 €		
			<b>Beleuchtung Ausgänge (wenn Rettungsstollen vorhanden)</b>							
			02-14-09	Halogenstrahler 500 W			Stk	255,80 €		
		<b>Rettungsstollen</b>								
		02-14-10	Fluchtwegleuchte			Stk	286,92 €			
		02-14-11	Fluchtwegleuchte gem. DIN			Stk	81,96 €			
		<b>Aktive Leiteinrichtung</b>								
		Aktive Leiteinrichtung		02-14-12	Generatoreinheit 1 für induktive Leiteinrichtung			Stk	3.428,87 €	
				02-14-14	Steuerverkabelung Generatoreinheit			Stk	228,81 €	
				02-14-15	Leuchtmittel bidirektional weiß			Stk	130,49 €	
		02-14-16	Einkoppler/ Stromabnehmereinheit			Stk	34,47 €			
		02-14-17	Verguss im Notgehweg			Stk	13,09 €			
		02-14-18	Verkabelung in Leerrohr			m	5,39 €			

**Abbildung 8-27: Standardraum Fluchweg- und Orientierungsbeleuchtung**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €
				<b>Kopfstation</b>					
		Kopfstation	02-15-01	Kopfstation Analog zur Anschaltung der Gerätesätze für Kanäle: 2 x 4m BOS, 2 x 2m BOS RS1 Relais. Zur Anschaltung der HF Koppelfelder Analog, 2m RS1, Antennen 4m			17.012,50 €		
			02-15-02	Kopfstation UKW. Anschaltung Antennen UKW, UKW			11.740,42 €		
			02-15-03	Kopfstation Digitalfunk Digitalfunk, Tunnel, Betriebszentrale			16.378,93 €		
			02-15-04	BOS Tetra TMO Repeater			26.890,32 €		
				<b>Koppelfelder</b>					
			02-15-05	kompl. Antennenkoppelfeld für Zusammenschaltung der 4m Gerätesätze			1.789,14 €		
			02-15-06	kompl. HF-Koppelfeld Analog			3.509,14 €		
			02-15-07	kompl. HF-Koppelfeld 2m			2.902,52 €		
			02-15-08	Kompl. HF Koppelfeld Digitalfunk			1.925,27 €		
			02-15-09	Kompl. HF Koppelfeld Tunnel			837,17 €		
			02-15-11	kompl. Antennenkoppelfeld UKW			4.245,80 €		
			02-15-12	kompl. HF-Koppelfeld UKW			361,43 €		
				<b>Gerätesatz</b>					
			02-15-13	Gerätesatz für BOS 4m			3.937,78 €		
			02-15-14	Gerätesatz für BOS 2m RS1 Relaisstelle			2.849,78 €		
			02-15-15	Gerätesatz UKW			3.480,36 €		
				<b>Ausbau Tunnelfunkzentrale</b>					
			02-15-16	Optisches Sendemodul			2.016,10 €		
			02-15-17	Optisches Empfangsmodul			1.341,40 €		
			02-15-18	19" OMU Baugruppenträger zur Aufnahme der optischen Sende-/ Empfangsmodule			1.941,95 €		
			02-15-19	Feuerwehr-Gebäudefunk Bedienfeld			610,87 €		
			02-15-20	Schnittstelle Ansteuerung 2m RS1			720,02 €		
			02-15-21	Mithöreinrichtung Verkehrsfunk			538,36 €		
			02-15-22	Ansagertextspeicher			2.924,99 €		
			02-15-23	Schnittstelle Lautsprecheranlage		psch	3.041,66 €		
			02-15-24	Optisches Empfangsmodul zum Empfang der HF Signale von der Kopf- oder Tunnelfunkstation			937,46 €		
				<b>Tunnelfunkstelle Querschlag</b>					
			02-15-25	Tunnelfunkstelle Querschlag 2 Zur Anschaltung folgender Repeater/Verstärker: 1 x 4m Band BOS 1 x 2m Band BOS 1 x UKW-Band (Verstärker) 1 x 70cm Band Digitalfunk Zur Anschaltung folgender HF- Koppelfelder: - 2m RS1 - Tunnel - Rettungsstollen - Digitalfunk			12.522,69 €		
			02-15-26	Kompl. HF Koppelfeld 2m			2.455,57 €		
			02-15-27	HF Repeater für BOS 4m			2.356,69 €		
			02-15-28	HF Repeater für BOS 2m			2.356,69 €		
			02-15-29	HF- Verstärker für UKW Band			1.344,40 €		
			02-15-30	Optisches Empfangsmodul			898,07 €		
			02-15-31	19" OMU Baugruppenträger zur Aufnahme der optischen Sende-/ Empfangsmodule			113,97 €		
				<b>Tunnelfunkstelle BZ</b>					
			02-15-32	Tunnelfunkstelle BZ Ost			7.526,30 €		
			02-15-33	Kompl. HF Koppelfeld 2m			4.936,88 €		
			02-15-34	Kompl. HF Koppelfeld Digitalfunk			1.925,27 €		
			02-15-35	HF Repeater für BOS 4m			2.356,69 €		
			02-15-36	HF Repeater für BOS 2m			2.356,69 €		
			02-15-37	HF- Verstärker für UKW Band			1.344,40 €		
			02-15-39	Optisches Empfangsmodul			898,07 €		
			02-15-40	19" OMU Baugruppenträger zur Aufnahme der optischen Sende-/ Empfangsmodule			113,97 €		
				<b>Verkabelung Leckkabel</b>					
			02-15-41	Leckkabel 1 1/4" Tunnel für Funkversorgung aller Kanäle und Dienste inkl. Digitalfunk			26,09 €		
			02-15-42	Leckkabel 7/8" Rettungsstollen für Funkversorgung aller Kanäle und Dienste inkl. Digitalfunk			24,87 €		
			02-15-43	Leckkabel 7/8" Betriebsgebäude für Funkversorgung aller Kanäle und Dienste inkl. Digitalfunk			51,06 €		
			02-15-44	HF-Verbindungskabel 7/8" Verlegeart Ri+Pr und Rohr als Verbindungskabel zwischen den Koppelfeldern und dem Strahlerkabel bzw. den Antennen			12,62 €		
			02-15-45	HF-Verbindungskabel 1/2" Verlegeart Ri+Pr und Rohr als Verbindungskabel zwischen den Koppelfeldern und dem Strahlerkabel bzw. den Antennen			8,63 €		
			02-15-46	HF-Verbindungskabel RG 214 Verbindungskabel zwischen HF- Verbindungskabeln, HF- Leckkabel bzw. Funkanlagen. Verlegeart Ri+Pr und Rohr			16,78 €		
			02-15-47	HF-Verbindungskabel 7/8" Verlegeart Putz als Verbindungskabel zwischen den Koppelfeldern und dem Strahlerkabel bzw. den Antennen			14,07 €		
			02-15-48	HF-Verbindungskabel 1/2" Verlegeart auf Putz als Verbindungskabel zwischen den Koppelfeldern und dem Strahlerkabel bzw. den Antennen			9,78 €		
			02-15-49	HF-Verbindungskabel RG 214 Verbindungskabel zwischen HF- Verbindungskabeln, HF- Leckkabel bzw. Funkanlagen. Verlegeart auf Putz			41,49 €		
				<b>Antennenanlage</b>					
			02-15-50	Freifeldantennenanlage Freistehender Antennenmast mit einer Masthöhe von 15 m zur Montage von folgenden Antennen: 1 x Antenne für Digitalfunk (BOS TETRA) mit Mastausleger 1 x 4m-Antenne mit Mastausleger 1 x UKW-Antenne mit Mastausleger 1 x 2m-Antenne mit Mastausleger 1 x Reserve Mastausleger mit Verbindungskabel zur Kopfstation			24.345,42 €		
			02-15-51	HVI Leitung			128,92 €		
			02-15-52	Blitzfangstange			1.068,33 €		
			02-15-53	Richtantennen 70 cm BOS Digitalfunk			572,39 €		
			02-15-54	Richtantennen UKW			537,87 €		
			02-15-55	Richtantenne 4m BOS			367,74 €		
			02-15-56	Portalantenne 2m			489,13 €		
				<b>Sonstiges</b>					
			02-15-57	Leckkabelschalter			385,45 €		
			02-15-58	Leckkabelüberwachungssystem mit Signalisierung eines Leckkabelbruchs und Steuerung der Leckkabelschalter bei Kabelbruch			3.812,26 €		
			02-15-59	Kabelstecker			3.299,75 €		
			02-15-60	Blitzschutz + Überspannungsableiter für 7/8 bzw 1/2" HF Kabel			74,12 €		
			02-15-61	Kabelerdungen			67,23 €		
			02-15-62	Koordinierung Funk Anmeldung			679,57 €		
			02-15-63	Funkmessung vor Ausführung			5.045,65 €		
			02-15-64	Funkmessung nach Ausführung			5.330,20 €		

Abbildung 8-28: Standardraum Tunnelfunk

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	0,00 €	GP	
				<b>Mittelspannungsanlage</b>						
			02-16-01	Ringkabelfeld (F1+2)		Stk	12.961,45 €			
			02-16-02	Übergabefeld (Feld 3)		Stk	8.906,23 €			
			02-16-03	Messfeld (Feld 4)		Stk	6.599,32 €			
			02-16-04	Leistungsschalterfeld (Feld 5)		Stk	18.939,87 €			
			02-16-05	Transformatorfeld (Feld 6 + 7)		Stk	10.624,31 €			
			02-16-06	Schutzerdung		Stk	589,69 €			
			02-16-07	Druckabsorbersystem		Stk	3.596,24 €			
			02-16-08	Druckberechnung		Stk	2.737,58 €			
			02-16-09	Verkabelung EVU-Zählerschrank		Stk	496,12 €			
			02-16-10	Zählerschrank		Stk	1.307,63 €			
			02-16-11	Kurzschluss- u. Erdschlussanzeiger		Stk	380,17 €			
			02-16-12	Spannungsanzeigergerät		Stk	47,00 €			
			02-16-13	UMZ Schutz		Stk	4.200,87 €			
			02-16-14	Leitungsdifferentialschutz		Stk	7.699,75 €			
			02-16-15	Spannungswandler bis 24 kV		Stk	961,67 €			
			02-16-16	Arbeitsstromauslöser		Stk	291,32 €			
			02-16-17	Steuerbatterieanlage		Stk	6.444,18 €			
			02-16-18	Verlegen der Mess- und Steuerleitungen		psch	1.317,61 €			
			02-16-19	Wandschrank mit Klemmleisten		Stk	1.268,22 €			
				<b>Schaltanlagenzubehör</b>						
			02-16-20	Kabelwinkelstecker 24 kV		Stk	1.032,15 €			
			02-16-21	Gießharz-Endverschluss Kabel 20 kV		Stk	114,43 €			
			02-16-22	Schaltschrankschlüssel		Stk	11,94 €			
			02-16-23	Wandtafel		Stk	132,30 €			
			02-16-24	Schalthebel		Stk	43,30 €			
			02-16-25	Schalthebel VDEW		Stk	40,00 €			
			02-16-26	Handkurbel		Stk	56,15 €			
			02-16-27	Schutzhelm mit Gesichtsschutz		Stk	108,15 €			
			02-16-28	Spannungsprüfer		Stk	417,79 €			
			02-16-29	Erdungsstange		Stk	97,46 €			
			02-16-30	Erdungsgarnitur für das Messfeld		Stk	407,56 €			
			02-16-31	Erdungsteil Trafo 800 kVA		Stk	375,02 €			
			02-16-32	Erdungsseil Trafo 1000 kVA		Stk	412,80 €			
			02-16-33	Schaltplan		Stk	158,35 €			
			02-16-34	Erd-Klemmbock mit 2 Trennlaschen		Stk	100,35 €			
			02-16-35	EVU Abnahmegebühren		Stk	686,31 €			
			02-16-36	Sicherheitsschilder		Stk	206,62 €			
			02-16-37	Kabelabdeckhauben		Stk	11,25 €			
			02-16-38	Schreibpult		Stk	114,51 €			
			02-16-39	DS Gießharztrafo 800 kVA		Stk	14.350,04 €			
			02-16-40	Trafoanschlusskonstruktion		Stk	441,80 €			
			02-16-41	Trafoanschlusskonstruktion US		Stk	481,24 €			
			02-16-42	1 Paar Fahrschienen		Stk	730,44 €			
			02-16-43	Holzschutzleiste ca 2,00 m lang		Stk	58,90 €			
			02-16-44	Erdungs Transformator		psch	320,69 €			
				<b>Niederspannungsanlage</b>						
441	Energieversorgung		02-16-45	950 V Trafo, 40 kVA		Stk	2.740,80 €			
442			02-16-46	Sicherungsleisttrenner 1000 V		Stk	266,90 €			
443			02-16-47	Isolationsüberwachung		Stk	2.045,73 €			
444			02-16-48	Kompensationsanlage 150 kvar		Stk	2.532,77 €			
			02-16-49	Kompensationsanlage 500 kvar		Stk	10.433,70 €			
			02-16-50	E-Schaltschrank 2200x1000x600		Stk	1.471,81 €			
			02-16-51	S-Schaltschrank 2200x800x1000		Stk	628,73 €			
			02-16-52	Dachlüfter 400 m³/h		Stk	250,47 €			
			02-16-53	Dachlüfter 1500 m³/h		Stk	541,44 €			
			02-16-54	Sammelschienen 250 A		Stk	176,09 €			
			02-16-55	Leistungsschalter 3polig, 100A		Stk	905,04 €			
			02-16-56	Leistungssch. mit MA 3polig, 1600A		Stk	2.744,10 €			
			02-16-57	Leistungssch. mit MA 3polig, 2500A		Stk	3.986,34 €			
			02-16-58	Lasttrennschalter 3polig, 63A		Stk	76,35 €			
			02-16-59	Bypassumschalter 400 A		Stk	587,97 €			
			02-16-60	Motorschutzschalter 1,2 A		Stk	67,37 €			
			02-16-61	Niederspannungstromwandler 63/5A		Stk	86,65 €			
			02-16-62	Multifunktionsmessgerät		Stk	318,07 €			
			02-16-63	Unter-Überspannungsauslöser, 400 V		Stk	57,39 €			
			02-16-64	Steuertransform. 230/230V, 1000 VA		Stk	193,40 €			
			02-16-67	RCD-LS 30mA, B 6 A, 2-pol.		Stk	46,65 €			
			02-16-68	RCD-LS 30mA, B 10 A, 2-pol.		Stk	43,77 €			
			02-16-69	RCD-LS 30mA, B 16 A, 2-pol.		Stk	39,79 €			
			02-16-70	Sicherungsautomat B 16 A, 1-polig		Stk	13,66 €			
			02-16-71	NH00-Sicherungsleisttrennsch. 3pol		Stk	56,14 €			
			02-16-72	NH01-Sicherungsleisttrennsch. 3pol		Stk	115,90 €			
			02-16-73	Drehstromluftschütz 20A, 400V		Stk	31,77 €			
			02-16-74	Steuerluftschütz 10A, 230V		Stk	32,16 €			
			02-16-77	Multifunktionszeitrelais		Stk	39,50 €			
			02-16-78	Relais, 16 A, 2S		Stk	22,85 €			
			02-16-79	Potentialtrenner		Stk	91,80 €			
			02-16-80	Isolationsüberwachung		Stk	1.018,68 €			
			02-16-81	Schuko-Steckdosen 16 A		Stk	7,58 €			
			02-16-82	Elektron. Sicherung 24V, 4-Kanal		Stk	35,80 €			
			02-16-83	Elektron. Sicherung 24V, 8-Kanal		Stk	500,66 €			
			02-16-84	Redundanzmodul 24V		Stk	27,96 €			
			02-16-85	Primärschaltregler 24V		Stk	71,29 €			
			02-16-86	Netzgerät 400 V/24 V, 10A redundant		Stk	47,18 €			
			02-16-87	Netzgerät 400 V/24 V, 40A redundant		Stk	83,14 €			
			02-16-88	Schaltplankebene Einspeisung		Stk	59,92 €			
			02-16-89	Leuchtdrucktaster LED		Stk	8,32 €			
			02-16-90	Kontrolllampe in LED-Ausführung		Stk	22,27 €			
			02-16-91	2pol. Steuerschalter, 2 Stellungen		Stk	35,39 €			
			02-16-92	2pol. Steuerschalter, 3 Stellungen		Stk	36,68 €			
			02-16-94	Schwenkrahm, f. Schaltschrank		Stk	95,58 €			
			02-16-95	Koppelrelais 24 V=		Stk	4,85 €			
			02-16-96	Überspannungsges. Steckdosenleiste		Stk	31,88 €			
			02-16-97	Verlegen Meß-u. Steuerleitungen		psch	110,46 €			
					<b>USV Anlage</b>					
				02-16-98	Modulare USV-Anlage BG Süd		Stk	12.493,50 €		
				02-16-99	Leistungsmodul 25 kVA		Stk	4.030,67 €		
				02-16-100	Batterieanlage 25 kVA 60 min		Stk	9.351,90 €		
				02-16-101	Batterieeinzelblocküberwachung		psch	14.778,16 €		
				02-16-102	Werksabnahme der USV-Anlage		Stk	1.357,53 €		

Abbildung 8-29: Standardraum Energieversorgung Teil 1

## Anhang B – Standardräume Tunnel

		<b>Blitzschutz/ Pot Betriebsgebäude</b>							
441 442 443 444	Energieversorgung	Blitzschutz/ Pot	02-16-103	Fangstange mit HVI-Anschluss BG Süd	Stk	524,64 €			
			02-16-104	HVI-Leitung	Stk	44,49 €			
			02-16-105	Fangleitung auf Abluftkamin	Stk	18,43 €			
			02-16-106	Trennstelle	Stk	7,90 €			
			02-16-107	Flachbandstahl 30x3,5	Stk	16,12 €			
			02-16-109	Messung Erdungsanlage	Stk	91,26 €			
			02-16-110	Flachbandstahl 30x3,5 Antennenmast	Stk	14,23 €			
			02-16-111	Messung Erdungsanlage	Stk	0,00 €			
			<b>Tunnelvorfeld</b>						
			02-16-112	Blitzschutz Mast Vorfelder	Stk	607,64 €			
			02-16-113	Tiefenerder	Stk	239,49 €			
			02-16-114	Messung Erdungsanlage	Stk	12,32 €			
			<b>Sonstige Anschlüsse</b>						
			02-16-115	Stahlkonstruktionsanschluss	Stk	7,35 €			
			02-16-116	Edelstahlklemmverbinder	Stk	9,36 €			
			02-16-117	Anschlüsse an Kabelpritschen etc.	Stk	18,34 €			
			02-16-118	Hauptpotenzialausgleichsschiene	Stk	72,68 €			
			02-16-119	Potenzialausgleichsschienen	Stk	45,61 €			
			02-16-120	Erdungsbrücken	Stk	9,72 €			
			02-16-121	flex. Edelstahlseil	Stk	8,45 €			
			02-16-122	Kabelenden, Einleiter	Stk	7,55 €			
			<b>Sonstiges</b>						
			02-16-123	Abstimmung Blitzschutz EVU	psch	84,03 €			
			02-16-124	Abstimmung Blitzschutz TK	psch	84,03 €			
			02-16-125	Vorlage Prüfprotokoll	psch	224,89 €			
			<b>Überspannungsschutz</b>						
			02-16-126	BSA + USA Typ 1+2 3pNPE	Stk	363,85 €			
			02-16-127	BSA + USA Typ 1+2 1pNPE	Stk	264,51 €			
			02-16-128	BSA Typ 1 3pNPE	Stk	384,69 €			
			02-16-129	USA Typ 2 3pNPE	Stk	126,92 €			
			02-16-130	USA Typ 2 1pNPE	Stk	69,92 €			
			02-16-131	USA Typ 3 1p	Stk	82,24 €			
			02-16-132	USA MSR Binär	Stk	97,88 €			
			02-16-133	USA MSR Analog	Stk	94,92 €			
			02-16-134	USA 4-Leiter-Binärsignale	Stk	136,78 €			
			02-16-135	LSA-Plus-Magazin	Stk	28,18 €			
			02-16-136	ÜSS 1DA gem. Potential	Stk	39,99 €			
			02-16-137	ÜSS 1DA erdpot.frei	Stk	37,78 €			
			02-16-138	ÜSS 1DA ISDN	Stk	35,43 €			
			02-16-139	ÜSS Datenschnittstellen	Stk	106,74 €			
			02-16-140	USA Lautsprecher	Stk	78,88 €			
			02-16-141	BSA + USA Koax-Kabel	Stk	101,00 €			
			02-16-142	Konzept	psch	2.402,32 €			
			02-16-143	Risikoabschätzung	psch	1.150,24 €			
02-16-144	Iso-Gehäuse	Stk	262,02 €						
02-16-145	ÜSS 3 x 2,5 mm²	Stk	14,10 €						
02-16-146	ÜSS 2 x 4 mm²	Stk	11,01 €						
02-16-147	ÜSS 5 x 2,5 mm²	Stk	13,94 €						
02-16-148	ÜSS bis 5 x 35 mm²	Stk	29,68 €						
02-16-149	ÜSS 5 x 95 mm²	Stk	38,07 €						
02-16-150	ÜSS 6 x 2 x 0,8	Stk	15,30 €						
02-16-151	ÜSS 10 x 2 x 0,8	Stk	10,60 €						
<b>Brandschutz</b>									
Brandschutz	02-16-152	S90-Schott für Aussparung 80/100	Stk	72,61 €					
	02-16-154	Wandschott Tunnel 20/20/20	Stk	31,58 €					
	02-16-155	Wandschott Tunnel 120/30/20	Stk	60,84 €					
	02-16-156	S90-Schott Tunnel Leerrohre 75mm	Stk	11,86 €					
	02-16-157	S90-Schott Tunnel Leerrohre 110mm	Stk	5,63 €					
	02-16-158	F90-Verkl. 150x500 mm, 6 m Kalotte	Stk	1.216,51 €					
	02-16-159	feuerbest. Kabeltrassenraum	Stk	0,00 €					
	02-16-160	Fugenabdeckblech Pressfuge	Stk	31,24 €					
	02-16-161	Fugenabdeckblech Raumfuge	Stk	31,24 €					

**Abbildung 8-30: Standardraum Energieversorgung Teil 2**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €	
				<b>Steuerung</b>						
		Steuerung	02-17-01	Hochverfügbare SPS allgemein		psch	24.694,14 €			
			02-17-02	Profilbus-Inspektor		Stk	2.359,13 €			
			02-17-03	SPS-Steuerung MFM		Stk	468,68 €			
			02-17-04	Embedded-PC OPC		Stk	3.657,34 €			
			02-17-05	Steuerungssoftware		Stk	54.429,35 €			
			02-17-06	Auswerteschwarte MFM		Stk	761,73 €			
			02-17-07	Mehrpriis (100 Datenpunkte)		Stk	1.383,27 €			
			02-17-08	Mehrpriis (10 Datenpunkte)		Stk	204,68 €			
			02-17-09	UE BGN Mittelspannung		Stk	2.079,08 €			
			02-17-10	UE BGN Netz Allgemein/ NSHV Netz		Stk	4.561,05 €			
			02-17-11	UE BGN USV Allgemein		Stk	3.759,36 €			
			02-17-12	UE BGN Strahlventilatoren		Stk	2.320,26 €			
			02-17-13	UE BGN Videoanlage		Stk	3.768,77 €			
			02-17-14	UE BGN Lautsprecheranlage		Stk	2.760,26 €			
			02-17-15	UE BGN Brandmeldeanlage		Stk	3.551,44 €			
			02-17-16	UE BGN aktive Leiteinrichtung		Stk	1.707,11 €			
			02-17-17	UE BGN Raumbelüftung		Stk	7.344,79 €			
			02-17-18	UE BGN Steuerung Allgemein		Stk	677,84 €			
			02-17-19	UE BGN Löschwasser DEA		Stk	3.143,14 €			
			02-17-20	UE Funkanlage		Stk	1.897,32 €			
			02-17-21	UE SST N1 Streckenstation		Stk	2.341,12 €			
			02-17-22	UE SST N2		Stk	405,62 €			
			02-17-23	UE N-01 Notrufrakabine (Anzahl NRK)		Stk	2.694,27 €			
			02-17-24	Interface-Modul		Stk	931,61 €			
			02-17-25	Ein-/Ausgabemodul für 16 DE		Stk	347,56 €			
			02-17-26	Ein-/Ausgabemodul für 16 DA		Stk	419,27 €			
			02-17-27	Ein-/Ausgabemodul für 8 AE		Stk	523,17 €			
			02-17-28	Ein-/Ausgabemodul für 8 AA		Stk	782,39 €			
			02-17-29	Ein-/Ausgabemodul für seriell		Stk	130,90 €			
			02-17-30	Elektr. Optische Umsetzer		Stk	553,83 €			
			02-17-31	Notbedienfeld		Stk	2.766,49 €			
			02-17-32	Feuerwehrbedienfeld		Stk	1.492,56 €			
			02-17-33	Polizeibedienfeld		Stk	1.299,42 €			
			02-17-34	Handbedienfeld Beleuchtung		Stk	2.692,37 €			
			02-17-35	Handbedienfeld Messwertf Erfassung		Stk	6.335,02 €			
			02-17-36	Handbedienfeld Abluftventilator		Stk	3.000,38 €			
			02-17-37	Handbedienfeld Auffangbecken		Stk	1.247,72 €			
			02-17-38	Handbedienfeld V1+V2		Stk	1.829,48 €			
			02-17-39	Handbedienfeld V3+V4		Stk	1.829,48 €			
			02-17-40	Handbedienfeld V5+V6		Stk	1.829,48 €			
			02-17-41	Handbedienfeld Lüftemische		Stk	912,56 €			
			02-17-42	Handbedienfeld Lüfter RDS RS		Stk	977,23 €			
			02-17-43	Handbedienfeld Lüfter AX RS		Stk	977,23 €			
			02-17-44	zus. Leuchtdrucktaster		Stk	76,53 €			
			02-17-45	zus. Leuchttaster		Stk	76,53 €			
		02-17-46	zus. LED-Anzeige		Stk	32,25 €				
		02-17-47	zus. LED-Anzeige		Stk	133,59 €				
		02-17-48	Touchpanel Beleuchtung		Stk	3.224,13 €				
		02-17-49	Visualisierung TP Beleuchtung		Stk	1.532,92 €				
		02-17-50	Touchpanel Strahlventilatoren		Stk	3.969,11 €				
		02-17-51	Visualisierung TP Ventilatoren		Stk	1.448,87 €				
		02-17-52	Touchpanel Axialventilatoren		Stk	5.831,28 €				
		02-17-53	Visualisierung TP Ventilatoren		Stk	1.553,86 €				
			<b>ZLT Hardware</b>							
		ZLT Hardware	02-17-54	ZLT Server		Stk	5.882,21 €			
			02-17-55	ZLT Bedienstation		Stk	3.262,36 €			
			02-17-56	24" LED-Display (ZLT)		Stk	442,28 €			
			02-17-57	Wandkonsole für 24" Monitor		Stk	191,49 €			
			02-17-58	Rack KVM-Konsole		Stk	1.707,72 €			
			02-17-59	KVM-Switch 4-Port		Stk	899,51 €			
			02-17-60	KVM-Extender-Set 2-Port		Stk	674,38 €			
			02-17-61	USB-Verlängerung		Stk	135,79 €			
			02-17-62	Multifunktionslaserdrucker A4		Stk	1.318,54 €			
			02-17-63	Aktivlautsprecherpaar		Stk	173,03 €			
			02-17-64	Zeitserver		Stk	1.236,76 €			
			02-17-65	Backup Software (Server)		Stk	912,39 €			
			02-17-66	Backup Software (Agent)		Stk	168,16 €			
			02-17-67	NAS-Speichersystem für Backup		Stk	2.738,41 €			
			02-17-68	Netzwerk Virenschämmer		Stk	243,93 €			
			02-17-69	SNMP Mischungen an ZLT/TLT		psch	1.570,61 €			
			02-17-70	Netzwerkintegration Tunnel		psch	2.224,13 €			
				<b>ZLT Software</b>						
		ZLT Software	02-17-71	Software Leitsystem		psch	58.286,31 €			
			02-17-72	Software Leitsystem - Lizenz		Stk	2.191,41 €			
			02-17-73	Software dyn. Leuchtschaltbild		Stk	4.937,86 €			
			02-17-74	Anpassung des Leuchtschaltbildes		Stk	108,94 €			
			02-17-75	Mehrpriis (100 Datenpunkte)		Stk	1.647,88 €			
			02-17-76	Mehrpriis (10 Datenpunkte)		Stk	236,46 €			
			02-17-77	Werkstattnahme Steuerung/ZLT		Stk	6.832,15 €			
			02-17-78	Datenpunkttest		psch	2.689,93 €			
				<b>Aktives Netzwerk</b>						
			Aktives Netzwerk	02-17-79	Stack-Switch Layer 3, 24-Port		Stk	3.727,82 €		
		02-17-80		Stack-Switch Layer 3, 48-Port		Stk	3.236,57 €			
		02-17-81		SFP Transceiver SX (MMF)		Stk	209,83 €			
		02-17-82		Serial over IP		Stk	84,93 €			
		02-17-83		Industrieswitch, Ringfähig		Stk	437,84 €			
		02-17-84		Industrieswitch, Ringfähig mit PoE		Stk	578,46 €			
		02-17-85		SFP Transceiver LX (MMF/SMF)		Stk	22,13 €			
		02-17-86		Router und Firewall		Stk	315,82 €			
				<b>Passives Netzwerk</b>						
		Passives Netzwerk		02-17-87	Patchfeld Kat.3		Stk	11,84 €		
				02-17-88	Splicebox 24 Fasern (SMF)		Stk	745,63 €		
			02-17-89	Splicebox 48-Fasern (MMF)		Stk	1.707,52 €			
			02-17-90	Splicebox 24-Fasern (MMF)		Stk	966,01 €			
			02-17-91	19" Splicebox 24 Fasern E2000, MM		Stk	37,09 €			
			02-17-92	19" Patchfeld 24 Fasern E2000, MM		Stk	62,91 €			
			02-17-93	Patchkabel Kategorie 7		Stk	19,47 €			
			02-17-94	Patchkabel Singlemode		Stk	11,02 €			
			02-17-95	Patchkabel Multimode		Stk	22,82 €			
			02-17-96	Breakoutkabel 2 G50/125 Länge 5 m		Stk	88,54 €			
			02-17-97	Messung je Kupferkabel		psch	1.014,42 €			
			02-17-98	Messung alle Fasern MMF		psch	11,74 €			
			02-17-99	Messung alle Fasern SMF		psch	11,74 €			
				<b>Außenstelle</b>						
		Außenstelle	02-17-100	Daten-Vert. 1000/800 42HE		Stk	1.869,27 €			
			02-17-101	Dachlüfter 400 m³/h		Stk	291,82 €			
			02-17-102	Schukosteckdoseleiste 6-fach		Stk	40,39 €			
			02-17-103	Patchfeldmodulträger		Stk	24,86 €			
			02-17-104	Modul RJ-45/CAT6A		Stk	10,36 €			
			02-17-105	Rangierfelder		Stk	217,50 €			
			02-17-106	ZLT Bedienstation		Stk	2.685,59 €			
			02-17-107	Bedienstation für 4 Videomonitore		Stk	3.314,96 €			
			02-17-108	24" LCD Monitor (Video)		Stk	712,29 €			
			02-17-109	Wandkonsole für 24" Monitor		Stk	86,61 €			
			02-17-110	24" LED-Display (ZLT)		Stk	668,08 €			
			02-17-111	Betriebsmittelkennzeichnung		Stk	4,96 €			
			02-17-112	Netzwerkintegration Straßenm.		psch	3.194,03 €			
				<b>Mobile Außenstelle</b>						
			02-17-113	Notebook		Stk	3.133,61 €			
			02-17-114	Software auf Laptop einrichten		Stk	2.204,54 €			
			02-17-115	Software auf vorh. Laptop		Stk	2.204,54 €			

Abbildung 8-31: Standardraum Steuerung Teil 1



## Anhang B – Standardräume Tunnel

		ZLT Software						
Steuerung	ZLT Software	02-17-93	Software Leitsystem			psch	58.286,31 €	
		02-17-95	Software Leitsystem - Lizenz			Stk	2.191,41 €	
		02-17-96	Software dyn. Leuchtschaltbild			Stk	4.937,86 €	
		02-17-97	Anpassung des Leuchtschaltbildes			Stk	108,94 €	
		02-17-98	Mehrpreis (100 Datenpunkte)			Stk	1.647,88 €	
		02-17-99	Mehrpreis (10 Datenpunkte)			Stk	236,46 €	
		02-17-100	Werksabnahme Steuerung/ZLT			Stk	6.832,15 €	
	02-17-101	Datenpunkttest			psch	2.689,93 €		
			Aktives Netzwerk					
		Aktives Netzwerk	02-17-102	Stack-Switch Layer 3, 24-Port			Stk	3.727,82 €
			02-17-103	Stack-Switch Layer 3, 48-Port			Stk	3.236,57 €
			02-17-105	SFP Transceiver SX (MMF)			Stk	209,83 €
			02-17-107	Serial over IP			Stk	64,93 €
			02-17-108	Industrieswitch, Ringfähig			Stk	437,84 €
			02-17-109	Industrieswitch, Ringfähig mit PoE			Stk	578,46 €
			02-17-110	SFP Transceiver LX (MMF/SMF)			Stk	22,13 €
		02-17-111	Router und Firewall			Stk	315,82 €	
			Passives Netzwerk					
		Passives Netzwerk	02-17-112	Patchfeld Kat.3			Stk	11,84 €
			02-17-113	Spleissbox 24 Fasern (SMF)			Stk	745,62 €
			02-17-114	Spleissbox 48-Fasern (MMF)			Stk	1.707,52 €
			02-17-115	Spleissbox 24-Fasern (MMF)			Stk	966,01 €
			02-17-116	19" Spleissbox 24 Fasern E2000, MM			Stk	37,09 €
			02-17-117	19" Patchfeld 24 Fasern E2000, MM			Stk	62,91 €
			02-17-118	Patchkabel Kategorie 7			Stk	19,47 €
			02-17-119	Patchkabel Singlemode			Stk	11,02 €
			02-17-120	Patchkabel Multimode			Stk	22,82 €
			02-17-121	Breakoutkabel 2 G50/125 Länge 5 m			Stk	88,54 €
			02-17-122	Messung je Kupferkabel			psch	1.014,42 €
			02-17-123	Messung alle Fasern MMF			psch	11,74 €
			02-17-124	Messung alle Fasern SMF			psch	11,74 €
			Außenstelle					
		Außenstelle	02-17-125	Daten-Vert. 1000/800 42HE			Stk	1.869,27 €
			02-17-126	Dachlüfter 400 m³/h			Stk	251,82 €
			02-17-127	Schukosteckdosenleiste 6-fach			Stk	40,39 €
			02-17-128	Patchfeldmodulträger			Stk	24,86 €
			02-17-129	Modul RJ-45/CAT6A			Stk	10,36 €
			02-17-130	Rangierfelder			Stk	217,50 €
			02-17-131	ZLT Bedienstation			Stk	2.685,59 €
			02-17-132	Bedienstation für 4 Videomitore			Stk	3.314,90 €
			02-17-133	24" LCD Monitor (Video)			Stk	712,29 €
			02-17-134	Wandkonsole für 24" Monitor			Stk	86,61 €
			02-17-135	24" LED-Display (ZLT)			Stk	668,08 €
			02-17-136	Betriebsmittelkennzeichnung			Stk	4,96 €
	02-17-137		Netzwerkintegration Straßenm.			psch	3.194,03 €	
			Mobile Außenstelle					
	02-17-138	Notebook			Stk	3.133,61 €		
	02-17-139	Software auf Laptop einrichten			Stk	2.204,54 €		
	02-17-140	Software auf vorh. Laptop			Stk	2.204,54 €		

**Abbildung 8-32: Standardraum Steuerung Teil 2**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €		
484	Verkabelung	Starkstromkabel	<b>Starkstromkabel</b>								
			02-18-01	NYCWY 4x70/35 auf Putz		m	31,24 €				
			02-18-02	NY Y - J auf Putz (Adaptionsbeleuchtung) 3*2,5		m	2,01 €				
			<b>Mantelleitung</b>								
			02-18-03	NHXMH auf Putz		m	4,43 €				
			<b>Kabel mit verbessertem Brandverhalten</b>								
			02-18-04	N2XH - J auf Putz (DF Tag)		m	3,22 €				
			<b>Kabel Funktionserhalt 90 min</b>								
			02-18-05	NHXCH E90 auf Putz (DF Nacht)		m	3,22 €				
			02-18-06	NHXH E 90 auf Putz Belüftung Energie		m	6,61 €				
			<b>Fernsprechkabel</b>								
			02-18-07	A-2y F(L) 2Y (vom BG zur Ventilatorreihe)		m	2,63 €				
			<b>Datenleitung</b>								
			02-18-08	Li2YCY		m	2,89 €				
			<b>LWL Außenkabel Singlemode</b>								
			02-18-09	A-DQ(ZN)B2Y		m	5,35 €				
			<b>Datenkabel für lokale Netze</b>								
			02-18-10	Datenkabel Cat7 auf Putz		m	18,46 €				
			<b>Leitung für BMA</b>								
			02-18-11	JB-H(S)H auf Putz		m	1,41 €				
			<b>Systemkabel, Zubehörkabel</b>								
			02-18-12	Übergangsmuffe von 70 auf 25 qmm		Stk	180,41 €				
			02-18-13	Übergangsmuffe von 95 auf 25 qmm		Stk	192,77 €				
			02-18-14	Übergangsmuffe von 150 auf 25 qmm		Stk	272,10 €				
			02-18-15	Übergangsmuffe von 185 auf 25 qmm		Stk	318,91 €				
			02-18-16	Übergangsmuffe von 240 auf 25 qmm		Stk	426,12 €				
			02-18-17	Verbindungsmuffe 35 mm2		Stk	217,63 €				
			02-18-18	Verbindungsmuffe 50 mm2		Stk	176,35 €				
02-18-19	Verbindungsmuffe 120 mm2		Stk	241,25 €							
02-18-20	Verbindungsmuffe 185 mm2		Stk	385,90 €							
02-18-21	Verbindungsmuffe 240 mm2		Stk	565,56 €							
02-18-22	Warmschrumpfmuffe für 6x2x0,8		Stk	74,90 €							
02-18-23	Warmschrumpfmuffe für 10x2x0,8		Stk	99,72 €							
02-18-24	Warmschrumpfmuffe für 20x2x0,8		Stk	128,70 €							
02-18-25	Halogenfr. Abzweigkasten, IP 65		Stk	70,84 €							
02-18-26	Abzweigkasten, F90, IP 65, 6mm2		Stk	99,30 €							
02-18-27	Anschlüsse an Kabelpritschen etc.		Stk	11,19 €							
02-18-28	Flexi. Kupferbänder 16mm2		Stk	20,46 €							

Abbildung 8-33: Standardraum Verkabelung

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €	
	Kabeltragsysteme		<b>Kabeltragsysteme</b>							
			02-19-01	E0 Kabelrinne 200 x 60mm		Stk	69,77 €			
			02-19-02	Formstücke Kabelrinne 200 x 60 mm		Stk	48,23 €			
			02-19-03	E-90 Kabelrinne 200 x 60 mm		Stk	57,44 €			
			02-19-04	Formstück E90-Kabelrinne 200 x 60		Stk	48,23 €			
			02-19-05	E0 Kabelleiter 500 x 60 mm		Stk	25,35 €			
			02-19-06	E90 Kabelleiter 300 x 60 mm		Stk	40,71 €			
			02-19-07	Formstücke Kabelleiter 500 x 60 mm		Stk	39,40 €			
			02-19-08	E90 Steigtrasse 200 mm		Stk	22,56 €			
			02-19-09	Trennsteg		Stk	1,73 €			
			02-19-10	Edelstahlrohr M 25		Stk	33,98 €			
			02-19-11	Edelstahlrohr M 32		Stk	43,12 €			
			02-19-12	Edelstahlrohr M 40		Stk	53,27 €			
			02-19-13	Edelstahlrohr M 63		Stk	71,56 €			
			02-19-14	Halogenfr. Installationsrohr M 25		Stk	8,00 €			
			02-19-15	Halogenfr. Installationsrohr M 40		Stk	12,16 €			
			02-19-16	Halogenfr. Installationsrohr M 63		Stk	19,61 €			
			02-19-17	Kunststoffkanal 40 x 60 mm		Stk	8,34 €			
			02-19-18	Kunststoffkanal 40 x 110 mm		Stk	16,91 €			
			02-19-19	Kunststoffkanal 60 x 210 mm		Stk	31,35 €			
02-19-20	Steigtrasse		m	22,56 €						

Abbildung 8-34: Standardraum Kabeltragsysteme

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				0,00 €
370								
371					Menge	ME	EP	GP
				<b>Asphaltfahrbahn</b>				
	Fahrbahn	Neubau	02-20-01	Frostschuttschicht, Dicke = 41 cm		m²	23,80 €	
			02-20-02	Asphalttragschicht AC 22 TS, Dicke = 22 cm		m²	30,78 €	
			02-20-03	Asphaltbinderschicht AC 16, Dicke = 8 cm		m²	17,81 €	
			02-20-04	Asphaltdeckschicht aus Splittmastixasphalt SMA 11 S, Dicke 4,0 cm		m²	12,84 €	
394				<b>Abbruchmaßnahmen</b>				
	Abbruch	02-20-05	Asphalt fräsen und Material aufnehmen. Asphaltdeckschicht		m²	11,63 €		
		02-20-06	Schicht ohne Bindemittel ausbauen. Schichtart "FSS"		m²	4,86 €		

**Abbildung 8-35: Standardraum Fahrbahn**

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung				0,00 €
					Menge	ME	EP	GP
				<b>Kappen</b>				
371	Kappen	Neubau	02-21-01	Kappe nach Unterlagen d. AG aus Stahlbeton herstellen Expositionsclassen XC4, XD3, XF4, Druckfestigkeitsklasse C 25/30		m²	195,90 €	
			02-21-02	Betonstahlbewehrung nach Unterlagen des AG herstellen. Bauwerksteile "Kappen". Stahlsorte BSt 500 S.		t	1.104,84 €	
				<b>Abbruch</b>				
	Abbruch	02-21-03	Kappen aus Stahlbeton nach Unterlagen des AG abbrechen.		m²	187,60 €		

**Abbildung 8-36: Standardraum Kappen**

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €
				<b>Bergwasserdrainage</b>					
			02-23-01	Bergwasserdrainage zwischen Innen- und Außenschale. Teilsickerrohr DN 200 gem. Riz Ing T Drän 1. Material: PE-HD. Beidseitig am Ulmenfuß		m	40,29 €		
			02-23-02	Spülschacht Bergwasser Drainage gem. Riz Ing T Was 11. 60 cm x 100 cm. Gem. Riz Ing T Was 11. Alle 70 - 100 m		Stk	1.663,94 €		
			02-23-03	Zulage Schachtanschluss. Rohrleitung DN 200 PE-HD Bergwasser Drainageleitung. Spülschacht		Stk	47,87 €		
				<b>Längsentwässerung</b>					
			02-23-04	Schlitzrinne mit Bord Klasse D 400 gem. Riz Ing T Was 10		m	120,00 €		
			02-23-05	Entwässerungsschacht für Schlitzrinne gem. Riz Ing T Was 10		Stk	1.654,03 €		
			02-23-06	Reinigungsrohr mit Abschottung für Schlitzrinne gem. Riz Ing T Was 10		m	172,18 €		
			02-23-07	Rohrleitung für Tunnelentwässerung. Längsentwässerung aus Stahlbeton DN 300		m	60,95 €		
			02-23-08	Rohrleitung als Siphon gem. Riz Ing T Was 10. Gusseiserne Leitung. DN 200		m	226,54 €		
			02-23-09	Sohldrainage als Teilsickerrohr DN 200. Einbauort: Sohltiefpunkt. Material: PE-HD		m	41,20 €		
			02-23-10	Schacht für Tunnel für Längsentwässerung. Fertigteilschacht gem. Riz Ing T Was 10.		Stk	1.163,04 €		
			02-23-11	Schacht für Tunnel für Sohlentwässerung. Fertigteilschacht gem. Riz Ing T Was 10.		Stk	954,16 €		
			02-23-12	Zulage Schachtanschluss		Stk	182,29 €		
				<b>offene Bauweise</b>					
				<b>Bergwasserdrainage</b>					
			02-23-13	Dränschicht hinter Bauwerk für Tunnelwände herstellen. Dränschicht aus Dränmatte gem. Riz-Ing Was 7		m <sup>2</sup>	7,28 €		
			02-23-14	Revisionschacht für Tunnelrückentwässerung		Stk	1.482,37 €		
			02-23-15	Rohrleitung zur rückwärtigen Entwässerung bestehend aus Grundrohr und Austritt- bzw. Anschlussrohr. Einbauort: Tunnelwände. Gem. Riz ing Was 7		m	70,94 €		
				<b>Längsentwässerung Schlitzrinne mit Tauchwand</b>					
			02-23-16	Bordschlitzrinne Klasse D 400 auf Bettung aus Beton C 12/15 Schlitzrinne DN 300.		m	130,51 €		
			02-23-17	Schacht für Tunnel gem. Riz Ing T Was 2. Revisionschacht für Entwässerung Hohlborndrinne		Stk	1.482,37 €		
			02-23-18	Gusseisernes Abflussrohr DN 200		m	110,34 €		
			02-23-19	Längsentwässerungsleitung DN 300.		m	69,60 €		
			02-23-21	Drainage DN 150 im Sohltefpunkt		m	45,28 €		
			02-23-22	Formstück für Bordschlitzrinne in Tunnel. Ablaufschacht mit Tauchwand Riz Ing T Was 2. Anschlussleitung DN 200		Stk	1.575,36 €		
			02-23-23	Formstück für Bordschlitzrinne in Tunnel. Anfangsstück mit Abschottung und Reinigungsöffnung		Stk	491,43 €		
			02-23-24	Schachtanschluss für gusseiserne Rohrleitungen im Tunnel DN 200. Anschlussleitung von Tauchwand Fertigteilschacht		Stk	79,76 €		
			02-23-25	Schachtanschluss für Rohrleitungen im Tunnel DN 300. Längsentwässerung aus Gusseisen		Stk	73,12 €		
				<b>Längsentwässerung Schlitzrinne mit Siphonierung</b>					
			02-23-26	Bordschlitzrinne Klasse D 400 auf Bettung aus Beton C 12/15 Schlitzrinne DN 300.		m	130,51 €		
			02-23-27	Formstück für Bordschlitzrinne in Tunnel. Ablaufschacht mit Tauchwand Riz Ing T Was 2 DN 200		Stk	1.575,36 €		
			02-23-28	Formstück für Bordschlitzrinne in Tunnel. Anfangsstück mit Abschottung und Reinigungsöffnung		Stk	491,43 €		
			02-23-29	Reinigungsrohr mit Abschottung für Schlitzrinne gem. Riz Ing T Was 1		m	372,96 €		
			02-23-30	Rohrleitung als Siphon gem. Riz Ing T Was 1. Gusseiserne Leitung DN 200		m	433,55 €		
			02-23-31	Rohrleitung für Tunnelentwässerung. Gusseiserne Leitung DN 300		m	69,60 €		
			02-23-32	Drainageleitung als Teilsickerrohr DN 150. Einbauort: Sohltefpunkt		m	45,28 €		
			02-23-33	Schacht für Tunnel. Fertigteilschacht nach Riz Ing Was 1		Stk	548,34 €		
			02-23-34	Zulage Schachtanschluss. Siphon Rohrleitung DN 200 Gusseisen		Stk	133,31 €		
			02-23-35	Zulage Schachtanschluss. Längsentwässerungsleitung DN 300 Gusseisen		Stk	73,12 €		
			02-23-36	Zulage Schachtanschluss. Längsentwässerungsleitung DN 150 Drainageleitung aus Kunststoff		Stk	46,91 €		
			02-23-37	Zulage Schachtanschluss. Längsentwässerungsleitung DN 200 Drainageleitung DN 200 Vollrohr		Stk	138,90 €		

Abbildung 8-37: Standardraum Entwässerung

## Anhang B – Standardräume Tunnel

KGR	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP
<b>Löschwasserleitung</b>								
474	Löschwasserleitung	Löschwasserleitung	02-23-01	Löschwasserleitung DN 150 aus GGG		m	70,07 €	
			02-23-02	Hydrantenzuleitung DN 80 aus GGG		Stk	58,08 €	
		Hydrant	02-23-03	Tunnelhydrant DN 80 als Überflurhydrant gem. RIZ Ing T Hyd 1		Stk	2.254,67 €	
			<b>Sonstiges</b>					
		Sonstiges	02-23-04	Dichtigkeits- und Druckprüfung der Löschwasserleitung durchführen		m	1,25 €	

**Abbildung 8-38: Standardraum Löschwasserleitung**

KGR	Funktionseinheit	Bauweise	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Positionsbeschreibung	Menge	ME	EP	GP	0,00 €		
<b>geschlossene Bauweise</b>												
<b>Abdichtung</b>												
385	Abdichtung	geschlossene Bauweise	Abdichtung	02-24-01	Abdichtungsträger aus Spritzbeton. Dicke = 4 cm gem ZTV-Ing Teil 5 Abschnitt 5			7,52 €				
				02-24-02	Schutzschicht aus Geotextil unter Dichtungsbahn > 900 g/m <sup>2</sup>			23,32 €				
				02-24-03	Abdichtung aus Kunststoffdichtungsbahn nach ZTV-Ing Teil 5 Abschnitt 5, d= 3 mm mit Signalbeschichtung			14,84 €				
			<b>Beschichtung</b>									
			Beschichtung	02-24-04	ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 Pkt. 11.2 im Farbton RAL 9010			10,62 €				
		02-24-05		Druckwasserstrahlen. Höhe: 3,00 m über OK Notgehweg			1,29 €					
		<b>offene Bauweise</b>										
		<b>Oberfläche</b>										
				offene Bauweise	Oberfläche	02-24-06	Betonoberfläche im Abdichtungsbereich strahlen. Strahlen im Kreuzgang			1,97 €		
						02-24-07	Betonoberflächenschutz im Abdichtungsbereich mit Reaktionsharz. 400 g/m <sup>2</sup> .			5,63 €		
		02-24-08	Reaktionsharz liefern					5,92 €				
<b>Abdichtung</b>												
		Abdichtung	02-24-09		Schutzschicht aus Geotextil unter Dichtungsbahn			4,15 €				
			02-24-10		Dichtungsschicht aus zweilagig aufgetragenen Bitumendichtungsbahnen herstellen.			18,78 €				
			02-24-11		Schutzschicht aus Beton in einer Dicke von mind. 10cm auf der Dichtungsschicht herstellen. Bewehrung aus BSt 500 M, Q188 einbauen			31,70 €				
<b>Tunnelwandbeschichtung</b>												
		Beschichtung	02-24-12	Tunnelwandanstrich bis 3 m über Notgehweg gem. ZTV-ING Teil 5 Abschnitt 1 Pkt. 11.2 im Farbton RAL 9010			10,62 €					
			02-24-13	Tunnelwand vor Beschichtung reinigen. Druckwasserstrahlen. Höhe: 3,00 m über OK Notgehweg			1,29 €					

**Abbildung 8-39: Standardraum Abdichtung**

## Anhang C – Standardräume Straßenverkehrswege

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname				
106								0,00 €
					Menge	ME	EP	GP
106	Erdbau		03-02-01	Untergrund Verbesserung herstellen.		m <sup>3</sup>	71,18 €	
			03-02-02	Trennschicht aus Geotextilien herstellen		m <sup>2</sup>	3,18 €	
			03-02-03	Oberboden abtragen 5-20 cm		m <sup>3</sup>	25,00 €	
			03-02-04	Boden lösen Ausbaudicke 0-15 cm		m <sup>3</sup>	31,29 €	
			03-02-05	Rasensaat auf Oberboden herstellen		m <sup>2</sup>	1,53 €	
			03-02-06	Planum herstellen und verdichten in "Banketten"		m <sup>2</sup>	0,39 €	
			03-02-07	Planum herstellen und verdichten in "Mittelstreifen"		m <sup>2</sup>	0,39 €	

Abbildung 8-40: Standardraum Erdbau

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname					
110								0,00 €	
					Menge	ME	EP		
110	Entwässerung	Herstellung	03-01-01	Straßenabläufe herstellen einschl. Formstücken, Aufsätze und Anschlussleitungen		Stk	384,29 €		
			03-01-02	Schacht herstellen einschl. Schachtabdeckung		Stk	1.992,86 €		
			03-01-03	Rohrleitung aus Beton herstellen DN 100		m	48,33 €		
			03-01-04	Schlitzrinne aus Beton herstellen		m	173,33 €		
			03-01-05	Entwässerungsrinne aus MA herstellen, Rinnenbreite 35 cm		m	22,06 €		
		Abbruch	<b>Abbruch</b>						
			03-01-06	Schachtabdeckung ausbauen		Stk	61,18 €		
			03-01-07	Straßenablauf Fertigteile ausbauen		Stk	152,49 €		
			03-01-08	Rohrleitung ausbauen		m	13,53 €		
			03-01-09	Entwässerungsrinnen ausbauen		m	33,13 €		

Abbildung 8-41: Standardraum Entwässerung

## Anhang C – Standardräume Verkehrswege

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Pos.-Nr.	Kostengruppenname				
129								0,00 €
131								
130					Menge	ME	EP	GP
				<b>Fahrzeug-Rückhaltesysteme (FRS) und Leiteinrichtungen</b>				
129		Fahrzeug-Rückhaltesysteme	03-04-01	Einfach Distanzschutzplanken (EDSP) Schutzeinrichtung herstellen, Stahl, Aufhaltevermögen H 2		m	40,17 €	
			03-04-02	Anfangs- und Endkonstruktion herstellen		Stk	382,50 €	
			03-04-03	Leitpfosten liefern und aufstellen		Stk	17,92 €	
				<b>Fahrbahnmarkierungen</b>				
			03-04-04	aufgelegt 3 mm, unterbrochene Mittellinie, Breite 12 cm herstellen		m	3,60 €	
131		Fahrbahnmarkierungen	03-04-05	aufgelegt 3 mm, durchgehende Randlinie, Breite 25 cm herstellen		m	5,00 €	
			03-04-06	Längsmarkierung TPM, durchgehend, 50 cm		m	16,40 €	
			03-04-07	eingelegt, 3/5 mm (Geradeaus, Links, Rechts) Länge 5 m herstellen		Stk	145,00 €	
				<b>Telematik Einrichtungen</b>				
			03-04-08	Fundament für Verkehrszeichenbrücke/ Kragarm herstellen		m³	522,02 €	
			03-04-09	Kragarm herstellen		Stk	18.686,00 €	
			03-04-10	liefern und aufstellen		Stk	38.843,67 €	
			03-04-11	liefern und aufstellen		Stk	48.334,95 €	
			03-04-12	Wechselverkehrszeichen Typ A: Geschwindigkeitszeichen liefern und anbringen		Stk	4.247,34 €	
			03-04-13	Wechselverkehrszeichen Typ B + C: Gefahrenzeichen + Text liefern und anbringen		Stk	5.070,70 €	
			03-04-14	und anbringen		Stk	1.773,60 €	
				<b>Abbruch</b>				
			03-04-15	Schutzeinrichtung abbauen		m	1,13 €	
			03-04-16	Einzelteil FRS abbauen		St	6,19 €	
			03-04-17	AEK herstellen		St	516,84 €	
			03-04-18	Leitpfosten abbauen		St	4,04 €	
			03-04-19	AEK abbauen		St	33,92 €	

**Abbildung 8-42: Standardraum Ausstattung**

## Anhang C – Standardräume Verkehrswege

LB	Funktionseinheit	Unterfunktionseinheit	Bauteil-Nr.	Kostengruppenname					
113								0,00 €	
114									
112					Menge	ME	EP	GP	
				<b>Abbruch</b>					
		Abbruch	03-03-01	Bankett vollständig ausbauen. Breite 1,25-2,50		m <sup>3</sup>	14,06 €		
			03-03-02	Planum herstellen und verdichten in "Banketten"		m <sup>2</sup>	0,39 €		
			03-03-03	Planum herstellen und verdichten in "Mittelstreifen"		m <sup>2</sup>	0,39 €		
			03-03-04	Bankett herstellen mit Querneigung 12% am tiefliegenden und Querneigung 6% am hochliegenden Fahrbahnrand		m <sup>2</sup>	4,07 €		
			03-03-05	Dicke 10 cm		m <sup>3</sup>	8,39 €		
			03-03-06	Dicke 20-40 cm		m <sup>3</sup>	18,10 €		
			03-03-07	HVT trennen		m <sup>3</sup>	0,44 €		
			03-03-08	Verfestigung im Baumischverfahren herstellen		m <sup>2</sup>	4,88 €		
			03-03-09	Hydr. Bindemittel liefern		t	109,54 €		
			03-03-10	Abstand 5 m		m	5,32 €		
			03-03-11	Asphalt fräsen. Asphaltdeckschicht aus Asphaltbeton, SMA und Gussasphalt. Frästiefe i.M. 4,5 cm		m <sup>2</sup>	6,54 €		
			03-03-12	Asphalt fräsen. Binderschicht. Frästiefe 7,5 cm bis 14 cm			6,54 €		
			03-03-13	Gebundenen Oberbau aufbrechen Dicke bis 30 cm		m <sup>2</sup>	21,42 €		
			03-03-14	Unterlage reinigen		m <sup>2</sup>	0,09 €		
			03-03-15	Asphalt trennen		m	13,98 €		
			03-03-16	Schichtenverbund herstellen durch Ansprühen der Unterlage mit bitumenhaltigen Bindemittel herstellen		m <sup>2</sup>	0,80 €		
				<b>Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht</b>					
		Oberbau Asphaltdecke	03-03-17	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €		
			03-03-18	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €		
			03-03-19	Mischgutart C		m <sup>2</sup>	36,41 €		
			03-03-20	Asphaltbinderschicht herstellen, Einbaudicke 8 cm		m <sup>2</sup>	21,41 €		
					<b>Asphalttragschicht und Tragschicht mit hydraulischem Bindemittel auf</b>				
			03-03-21	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €		
			03-03-22	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €		
			03-03-23	Verfestigung herstellen, Einbaudicke 15 cm		m <sup>2</sup>	6,50 €		
			03-03-24	Mischgutart C		m <sup>2</sup>	30,27 €		
			03-03-25	Asphaltbinderschicht herstellen, Einbaudicke 8 cm		m <sup>2</sup>	21,41 €		
					<b>Asphalttragschicht und Schottertragschicht auf Frostschutzschicht</b>				
			03-03-26	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €		
			03-03-27	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €		
			03-03-28	Kies- oder Schottertragschicht herstellen, Einbaudicke 15 cm		m <sup>2</sup>	6,00 €		
			03-03-29	Mischgutart C		m <sup>2</sup>	30,27 €		
			03-03-30	Asphaltbinderschicht herstellen, Einbaudicke 8 cm		m <sup>2</sup>	21,41 €		
					<b>Asphalttragschicht und Kiestragschicht auf Frostschutzschicht</b>				
			03-03-31	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €		
			03-03-32	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €		
			03-03-33	Kies- oder Schottertragschicht herstellen, Einbaudicke 20 cm		m <sup>2</sup>	12,00 €		
			03-03-34	Mischgutart C		m <sup>2</sup>	24,00 €		
			03-03-35	Asphaltbinderschicht herstellen, Einbaudicke 8 cm		m <sup>2</sup>	21,41 €		
					<b>Asphalttragschicht und Schotter- oder Kiestragschicht auf Schicht aus</b>				
			03-03-36	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €		
			03-03-37	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €		
			03-03-38	Kies- oder Schottertragschicht herstellen, Einbaudicke 30 cm		m <sup>2</sup>	12,00 €		
			03-03-39	Mischgutart C		m <sup>2</sup>	24,00 €		
			03-03-40	Asphaltbinderschicht herstellen, Einbaudicke 8 cm		m <sup>2</sup>	21,41 €		
					<b>Deckschicht Asphalt</b>				
			03-03-41	Deckschicht aus Asphaltbeton im Fahrbahnbereich herstellen, Einbaudicke 4 cm		m <sup>2</sup>	16,50 €		
			03-03-42	4 cm		m <sup>2</sup>	12,84 €		
			03-03-43	Deckschicht aus Gussasphalt herstellen		m <sup>2</sup>	22,86 €		
		03-03-44	Fuge herstellen bei Asphaltdeckschicht		m	4,00 €			
		03-03-45	Anschluss mit Fugenband herstellen		m	5,00 €			
				<b>Tragschicht mit hydraulischen Bindemitteln auf Frostschutzschicht mit</b>					
		03-03-46	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €			
		03-03-47	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €			
		03-03-48	Hydraulisch gebundene Tragschicht herstellen, 15 cm		m <sup>2</sup>	23,97 €			
		03-03-49	Trennschicht aus Geotextilien/ Vlies herstellen		m <sup>2</sup>	3,75 €			
				<b>Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht mit Betondecke</b>					
		03-03-50	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €			
		03-03-51	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €			
		03-03-52	Mischgutart C		m <sup>2</sup>	13,33 €			
				<b>Schottertragschicht auf Frostschutzschicht mit Betondecke</b>					
		03-03-53	Frostschutzschicht herstellen		m <sup>3</sup>	25,00 €			
		03-03-54	Bankette herstellen		m <sup>3</sup>	16,70 €			
		03-03-55	Kies- oder Schottertragschicht herstellen, Einbaudicke 20 cm		m <sup>2</sup>	20,00 €			
				<b>Oberbau Betondecke linke Fahrspur; Einbaudicke 27 cm</b>					
		03-03-56	Betondecke herstellen, Einbaudicke 27 cm		m <sup>2</sup>	56,00 €			
		03-03-57	Betondecke durch Aufbringen einer Wasser haltenden Abdeckung nachbehandeln		m <sup>2</sup>	3,10 €			
		03-03-58	Fugenspalt durch Schneiden aufweiten, Fugenspaltbreite 8 mm, Fugenspalttiefe 27 mm, Unterfüllstoff einbringen, verfüllen mit heiß verarbeiteter Fugenmasse		m	11,93 €			
		03-03-59	Fugenkerbe zum Fugenspalt durch Schneiden aufweiten, Fugenspaltbreite 8 mm, Fugenspalttiefe 27 mm, Unterfüllstoff einbringen, verfüllen mit heiß verarbeiteter Fugenmasse		m	12,44 €			

Abbildung 8-43: Standardraum Deckschicht