

Modell für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln unter Beachtung technischer und finanzieller Unsicherheiten

Dissertation

zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

der

Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Peter Vogt

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Thewes, Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb

Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Osebold, RWTH Aachen
Lehrstuhl für Baubetrieb und Projektmanagement

Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Schwarz, Universität der Bundeswehr München
Institut für Baubetrieb

Tag der Einreichung: 31. Juli 2012
Tag der mündlichen Prüfung: 18. Dezember 2012

„Ich finde ein kleines Land viel hübscher als ein großes. Besonders wenn es eine Insel ist“ sagte die Prinzessin.

„Dann ist ja alles in Ordnung“, meinte Jim zufrieden.

„Man könnte ein paar schöne Tunnel bauen“, stellte Lukas fest.

„Quer durch die Terrassen durch. Was meinst Du Jim? Es soll ja Deine Insel werden.“

„Tunnel?“ sagte Jim nachdenklich. „Das wär 'famos.“¹

¹ Ende, Michael: Jim Knopf und Lukas der Lokomotivführer. K. Thienemanns Verlag Stuttgart – Wien, 1960

Vorwort und Dank

Die vorgelegte Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb der Ruhr-Universität Bochum entstanden. Dem Inhaber des Lehrstuhls, Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes, danke ich herzlich für die Betreuung sowie das mir entgegengebrachte Vertrauen. Der intensive fachliche Austausch mit meinem Doktorvater hat die Basis dafür geschaffen, sukzessive ein an die tunnelspezifischen Rahmenbedingungen adaptiertes Lebenszykluskonzept zu entwickeln.

Den Herren Prof. Dr.-Ing. R. Osebold, Prof. Dr.-Ing. J. Schwarz und Prof. Dr.-Ing. J. Geistefeld danke ich für die Erstellung der Gutachten und ihre Mitwirkung in der Promotionskommission.

Zum Gelingen der Arbeit hat die sehr gute Atmosphäre am Lehrstuhl beigetragen. Allen Lehrstuhlangehörigen wünsche ich viel Erfolg und Kraft bei der Erreichung ihrer wissenschaftlichen Ziele. Aus dem Kreise der Lehrstuhlmitarbeiter möchte ich besonders Frau Dipl.-Ing. Anna-Lena Hammer für die bereichernde Zusammenarbeit sowie der studentischen Hilfskraft Frau Bella Agachanjan für ihre gewissenhafte Zuarbeit danken.

Den Ansprechpartnern der Bundesanstalt für Straßenwesen und der Baukonzerne HOCHTIEF und Bilfinger Berger sei dafür gedankt, dass sie für konstruktive Diskussionen zur Praxistauglichkeit der entwickelten Modelle zur Verfügung standen. Äußerst wichtige Aspekte habe ich zudem aus den Gesprächen mit Herstellern von Tunnelausrüstungen gewonnen. Ihnen gebührt ebenfalls ein herzlicher Dank.

Meiner Frau Katja gilt der größte Dank. Sie hat mich jederzeit vorbildlich unterstützt, insbesondere auch dann, wenn sich kein Licht am Ende des Tunnels abzeichnete. Meine Frau und meine drei wunderbaren Kinder mussten an vielen Wochenenden ein Familienleben unter Einschränkungen akzeptieren. Für ihr Verständnis kann ich nicht oft genug danken!

Schließlich danke ich meinen Eltern, Magdalena und Hermann Vogt, die mir in den 1990er Jahren ein Bauingenieurstudium ermöglicht haben. Das Fundament für eine wissenschaftliche Karriere wurde dadurch gelegt.

Meiner Frau und meinem Vater danke ich für die akribische Durchsicht der Konzepte und Texte sowie für viele wertvolle Verbesserungsvorschläge.

Sprockhövel, im Januar 2013

Peter Vogt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	v
Inhaltsverzeichnis	vii
Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
Kurzfassung	xvii
Abstract	xix
1 Einführung	1
1.1 Kosten für den Bau und Betrieb von Straßentunneln	1
1.2 Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung	5
1.4 Gliederung der Arbeit und wissenschaftliches Vorgehen	6
2 Tunnel im Straßennetz	8
2.1 Verkehrliche Bedeutung	8
2.2 Sicherheit	14
2.3 Entwicklung der Investitionen in Deutschland	16
2.3.1 Neubauten seit den 1970er Jahren	16
2.3.2 Bewirtschaftung von Straßentunneln	18
2.3.3 Zukünftige Herausforderungen hinsichtlich Neubau und Erneuerung von Straßentunneln	22
2.4 Beschreibung des heutigen Vorgehens bei der Investitionsplanung	24
2.5 Ansätze zum wirtschaftlichen Handeln in derzeit gültigen Regelwerken	26
2.5.1 Einführung	26
2.5.2 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 25/1998: Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“	28
2.5.3 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 6/2000: Straßenquerschnitte in Tunneln	29
2.5.4 ZTV-ING, Teil 5 – Tunnelbau, Abschnitt 4	30
2.5.5 RI-BWD-TU: Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln	31
2.5.6 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 10/2006: Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln	31
2.5.7 Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV	34
2.6 Anforderungen an eine zeitgemäße Bewirtschaftungsstrategie	36
3 Der Lebenszyklusgedanke – vom Ursprung bis zur Anwendung in der Bauwirtschaft	38
3.1 Begriffsbestimmung	38
3.2 Ausgangsbasis Produktlebenszyklus	38
3.3 Anpassung an die bauwirtschaftlichen Rahmenbedingungen	40
3.3.1 Der Unikatcharakter eines Bauwerks	40
3.3.2 Der Bauwerkslebenszyklus	41
3.4 Das Abnutzungsverhalten von Baustoffen und Bauteilen	47
3.4.1 Normative Grundlagen	47
3.4.2 Abgrenzung der wirtschaftlichen von der technischen Lebensdauer	51
3.4.3 Lebensdauerbegriffe in der Literatur und Einführung der theoretischen Nutzungsdauer	52
3.5 Kosten im Lebenszyklus eines Bauwerks	54

3.5.1	Kosten als Beurteilungskriterium	54
3.5.2	Stand der Forschung	56
3.5.3	Ansätze zur Berechnung der Lebenszykluskosten.....	60
3.5.4	Der strategische Umgang mit Initial- und Folgekosten.....	64
3.5.5	Potentiale der lebenszykluskostenbasierten Sichtweise	71
4	Kriterien für die Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken.....	73
4.1	Beschreibung der Ausgangslage	73
4.2	Anwendungsvoraussetzungen	74
4.2.1	Die Verknüpfung der Initial- und Folgekosten in Abhängigkeit vom Projektstatus.....	74
4.2.2	Einstiegs-Szenarien.....	75
4.3	Die Identifizierung von Kostenverursachern auf Baustoff- und Bauteilebene.....	78
4.3.1	Erläuterung der gewählten Systematik.....	78
4.3.2	Innere und äußere Randbedingungen des Planungsprozesses	79
4.3.3	Baustoffe im Tunnelbau – Materialeigenschaften und Abnutzungsverhalten	82
4.3.4	Bauteile und technische Betriebskomponenten in einem Straßentunnel.....	87
4.4	Der Umgang mit risikobehafteten Größen	92
4.4.1	Schwankungsbereiche von Initial- und Folgekosten	92
4.4.2	Unsicherheit und Unschärfe als risikobestimmende Parameter.....	95
4.4.3	Unsicherheiten im Zuge der Modellbildung	97
4.4.4	Identifizierung der mit Unsicherheiten behafteten Parameter	99
4.4.5	Ableitung parameterspezifischer Lösungsansätze	107
4.4.5.1	Arten von Prognoseverfahren.....	107
4.4.5.2	Theoretische Bauteilnutzungsdauer	108
4.4.5.3	Bauteilkosten und Projekterlöse	119
4.4.5.4	Kapitalzinssatz in der Investitionsrechnung.....	122
5	Entwicklung eines Modells zur Analyse der Lebenszykluskosten	125
5.1	Leitgedanke und Zielstellung.....	125
5.2	Investitionsrechnung	126
5.2.1	Erforderliche Leistungsfähigkeit.....	126
5.2.2	Konkretisierung der Methodik.....	127
5.3	Die sukzessive Verknüpfung der Einzelprozesse in Modultabellen.....	129
5.3.1	Allgemeine Struktur des Berechnungsmodells.....	129
5.3.2	Erfassung der Bauwerks- und Komponentenparameter in Modultabellen	131
5.3.3	Die Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix.....	136
5.3.4	Berücksichtigung der Preisentwicklung und des Zeitwerts des Geldes	140
5.4	Beschreibung des Analysemodells	144
5.4.1	Programmtechnische Realisierung.....	144
5.4.2	Modulare Modellkonfiguration.....	145
5.4.3	Anwendungsvoraussetzungen und -möglichkeiten	146
5.5	PTLCC – Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs	147
5.5.1	Anwendung.....	147
5.5.2	Aufbau und Umfang der Dateneingabe	148
5.5.3	Berechnungsergebnisse und deren Interpretation	150

5.6	Modul OTLCC – Operational Tunnel Life-Cycle Costs	152
5.6.1	Anwendung.....	152
5.6.2	Aufbau und Umfang der Dateneingabe	153
5.6.3	Berechnungsergebnisse und deren Interpretation	155
6	Anwendungsbeispiel: Die Lebenszykluskostenanalyse eines Bestandstunnels	157
6.1	Zielstellung und Vorgehen.....	157
6.2	Beschreibung des Modelltunnels	157
6.2.1	Allgemeine Angaben.....	157
6.2.2	Bestand.....	159
6.2.3	Nachrüstungs- und Sanierungsbedarf.....	160
6.3	Ableitung der modellspezifischen Eingangsparameter	162
6.3.1	Technische Parameter – Bauteile und Komponenten.....	162
6.3.2	Monetäre Parameter – Kostenhistorie und Fortschreibung.....	166
6.4	Eingabe in das OTLCC-Analysemodell und Berechnung	170
6.5	Ausgabe und Ergebnis	172
7	Fazit	175
7.1	Zusammenfassung.....	175
7.2	Ausblick.....	176
8	Literaturverzeichnis.....	179
9	Anlagen.....	188
10	Lebenslauf.....	207

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Tunnel der Bundesfernstraßen – Bestand nach Anzahl und Länge, nach [113].....	9
Abbildung 2:	Zweckbestimmung der Tunnel auf Bundesfernstraßen nach Fertigstellung in den angegebenen Zeiträumen, nach [17].....	10
Abbildung 3:	DTV-Klassen von Straßentunneln auf Bundesfernstraßen, nach [161], [48]	11
Abbildung 4:	Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs und Länge des Straßennetzes zw. 1991 und 2008, nach [31]	12
Abbildung 5:	Anteil der Aufwendungen für Tunnelneubauten an den Gesamtinvestitionen in das Bundesfernstraßennetz, mit Daten aus [48], [47], [70], [26], [18].....	17
Abbildung 6:	Kostenentwicklung für Neu- und Ausbau sowie für Betrieb und Unterhaltung des Bundesfernstraßennetzes zwischen 1975 und 2009, mit Daten aus [48] und [47]	19
Abbildung 7:	Entwicklung des Brutto- und des Netto-Anlagevermögens sowie des Modernitätsgrades der deutschen Straßeninfrastruktur zwischen 1991 und 2008, nach [31]	21
Abbildung 8:	Altersstruktur der Tunnel der Bundesfernstraßen und theoretische Nutzungsdauern, mit Daten aus [113] und [32].....	22
Abbildung 9:	Straßenquerschnittstypen bei Richtungsverkehrstunneln, nach [72]	30
Abbildung 10:	Lichttechnische Anforderungen in Abhängigkeit vom Standort im Tunnel, nach [57]	33
Abbildung 11:	Kosten- und Erlöse über die Dauer des Produktlebenszyklus	39
Abbildung 12:	Einflüsse, die ein Bauwerk zu einem Unikat machen	40
Abbildung 13:	Abgrenzung zwischen Rohbau- und Bauteilnutzungsdauer	43
Abbildung 14:	Das Lebenszyklus-Potential in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitpunkt	45
Abbildung 15:	Verknüpfung von Kausalitäten bei der Lebenszyklusplanung von Bauwerken (Szenario 1) ..	46
Abbildung 16:	Verknüpfung von Kausalitäten bei der Lebenszyklusplanung von Bauwerken (Szenario 2) ..	47
Abbildung 17:	Einflüsse auf das materielle Abnutzungsverhalten, nach [110]	48
Abbildung 18:	Prinzipien des materiellen Abnutzungsverhaltens, nach [110]	49
Abbildung 19:	Untergliederung der Instandhaltung, nach [55], [107], [77]	50
Abbildung 20:	Untergliederung der Instandhaltung, nach DIN EN 13306 [61]	50
Abbildung 21:	Lebens- und Nutzungsdauern im Bauwerkslebenszyklus, nach [142]	52
Abbildung 22:	Definition der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten theoretischen Nutzungsdauer	54
Abbildung 23:	Das Problem der unübersichtlichen Kosten, nach [67].....	55
Abbildung 24:	Verdeutlichung des Barwertkonzeptes	57
Abbildung 25:	Das Bauwerk im Lebenszyklus mit qualitativer Entwicklung der Kosten und Erlöse	59
Abbildung 26:	Qualitative Kostenverläufe und Kostenbeeinflussbarkeit, modifiziert nach [147]	67
Abbildung 27:	Die Substitution von Folge- durch Folgekosten während der Betriebs- und Unterhaltungsphase	70
Abbildung 28:	Wechselseitige Abhängigkeiten bei Tunnelprojekten	75
Abbildung 29:	Innere und äußere Randbedingungen bei der Planung von Straßentunneln	80
Abbildung 30:	Hierarchie der Ebenen der Tunnelbetriebstechnik	90
Abbildung 31:	Schwankungsbereiche für die Planwerte der Initial- und Folgekosten	94
Abbildung 32:	Auswirkungen von Unsicherheiten auf das Risiko der Lebenszykluskostenanalyse	98
Abbildung 33:	Systematik zur Generierung zukünftiger Daten auf Grundlage einer Datenhistorie.....	99
Abbildung 34:	Schema der Initial- und Folgekosten bei der szenarioabhängigen Lebenszykluskostenanalyse	100
Abbildung 35:	Verknüpfung der Unsicherheiten aus der Bauteillebensdauer und den Kosten zum Austausch des Bauteils j.....	103

Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Ausfallrisiko und Kosten für ein Bauteil	104
Abbildung 37: Schematische Darstellung zur Berücksichtigung verschiedener Preisentwicklungen.....	105
Abbildung 38: Zusammenhang statistischer Funktionen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens, nach [8]	109
Abbildung 39: Darstellung der Zusammenhänge von Abnutzungsverhalten und Ausfallwahrscheinlich- keit, nach [115].....	110
Abbildung 40: Charakteristik der Badewannenkurve, nach [8].....	111
Abbildung 41: Darstellungsformen einer zweiparametrischen Weibullverteilung.....	113
Abbildung 42: Systematik zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit.....	116
Abbildung 43: Strategien für den Austausch irreparabler Tunnelausstattung und das Risiko für den Betreiber.....	118
Abbildung 44: Entwicklung verschiedener Preisindizes (2000 = 100 %), nach [150].....	120
Abbildung 45: Entwicklung der jährlichen Veränderungen pf [%] einzelner Preisindizes, nach [150].....	121
Abbildung 46: Aufbau der Modultabellen	130
Abbildung 47: Durch die Modultabellen abzudeckender Umfang.....	131
Abbildung 48: Grafische Darstellung der Variablen j , d , a_j , s_j und q_j	132
Abbildung 49: Die systematische Verknüpfung der Variablen.....	135
Abbildung 50: Möglichkeiten zur Kombination der Initial- und Folgekosten sowie der Erlöse	140
Abbildung 51: Gruppierung der Ergebnisdarstellung.....	151
Abbildung 52: Barwertentwicklung für die in der Legende dargestellten Kombinationsmöglichkeiten.....	151
Abbildung 53: Entwicklung der Folgekostenindizes für das in Abbildung 52 gezeigte Beispiel	152
Abbildung 54: Grundriss Modelltunnel (nicht maßstäblich)	158
Abbildung 55: Abbildung des Ausfallverhaltens der KOMP.01 durch die Weibullverteilung	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Projektspezifische Investitionskosten für Tunnelbauwerke, nach [70]	2
Tabelle 2:	Projektspezifische Kosten zum Betrieb eines Tunnelbauwerks, nach [70]	3
Tabelle 3:	Jährliche Kosten für Betrieb und Unterhaltung von Straßentunneln, nach [70]	18
Tabelle 4:	In Bau befindliche und geplante Straßentunnel, nach [90], [91]	23
Tabelle 5:	Richtlinien, die wirtschaftliche Aspekte zu Tunnelplanung und -betrieb beinhalten	27
Tabelle 6:	Kriterienbewertung, nach [33]	28
Tabelle 7:	Theoretische Nutzungsdauern und Prozentsätze der jährlichen Unterhaltungskosten für Tunnel, nach [32]	36
Tabelle 8:	Zusammenstellung von Bauwerksnutzungsdauern	41
Tabelle 9:	Exemplarischer VoFi für die Investitionsalternative A, modifiziert nach [101]	62
Tabelle 10:	Stufen der Bau- und Baunutzungskostenermittlungen in Abhängigkeit von der HOAI-Leistungsphase, nach [53], [54], [50]	66
Tabelle 11:	Beispiele für die Anwendung des Substitutionsprinzips	68
Tabelle 12:	Die drei Einstiegs-Szenarien der Lebenszykluskostenanalyse	77
Tabelle 13:	Faktoren, die den Lebenszyklus von Straßentunneln beeinflussen	78
Tabelle 14:	Übersicht der Baustoffe und Baustoffeigenschaften	83
Tabelle 15:	Auswirkungen auf das Baustoffverhalten bei natürlichen Einwirkungen	86
Tabelle 16:	Auswirkungen auf das Baustoffverhalten bei anthropogenen Einwirkungen	86
Tabelle 17:	Charakteristika der Bauteile in der Rohbauphase	88
Tabelle 18:	Eigenschaften der Bauteile auf Feldebene	91
Tabelle 19:	Stufen der Kostenermittlung mit Angabe von Schwankungsbereichen, nach [53], [50], [39] und mit Daten aus [86], [84], [169], [148]	93
Tabelle 20:	Beispiele für Unsicherheit und Unschärfe in der Lebenszykluskostenanalyse	96
Tabelle 21:	Übersicht der mit Unsicherheit behafteten Eingangsgrößen	101
Tabelle 22:	Empfehlungen für die Abschätzung theoretischer Nutzungsdauern	119
Tabelle 23:	Beispiel zur Wahl unterschiedlicher Kapitalzinssätze	123
Tabelle 24:	Zusammenfassung der zur Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken benötigten Variablen	134
Tabelle 25:	Nominale Zeit-/Kostenmatrix	139
Tabelle 26:	Die Ergebnismatrix	144
Tabelle 27:	Bisherig dokumentiertes Ausfallverhalten der KOMP.01	162
Tabelle 28:	Ausfallwahrscheinlichkeiten und zugehörige Nutzungsdauern	164
Tabelle 29:	Rohbauelemente des Modelltunnels mit Nutzungsdauern	165
Tabelle 30:	Ausstattungsbestandteile des Modelltunnels mit Nutzungsdauern	165
Tabelle 31:	Initial- und Instandhaltungskosten für die Rohbaukomponenten auf der Preisbasis 1995	167
Tabelle 32:	Initial- und Instandhaltungskosten für die Ausstattungskomponenten auf der Preisbasis 1995	167
Tabelle 33:	Sekundäre Initialkosten und Folgekostenanteile für Rohbauelemente, Preisbasis 2012	168
Tabelle 34:	Sekundäre Initialkosten und Folgekostenanteile für Ausstattungskomponenten, Preisbasis 2012	169
Tabelle 35:	Kapitalwerte der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 1995, über 70 Jahre	172
Tabelle 36:	Kapitalwerte der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 2012, über 53 Jahre	173

Tabelle 37:	Kapitalwerte für alle Komponenten zum Referenzzeitpunkt 1995, über 70 Jahre	173
Tabelle 38:	Kapitalwerte für alle Komponenten zum Referenzzeitpunkt 2012, über 53 Jahre	174

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent	FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
§	Paragraph	FM	Facility Management
®	Registered Trademark	F-Modell	Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetz-Modell
€ / T€	Euro / Tausend Euro	FStrAbG	Fernstraßenausbaugesetz
A	Autobahn	FStrG	Bundesfernstraßengesetz
a	Jahr	FStrPrivFinG	Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetz
ABBV	Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung	FW	frühzeitige Wiederbeschaffung
AfA	Absetzung für Abnutzung	GE	Geldeinheit
A-Modell	Ausbau-Modell	GEFMA	Deutscher Verband für Facility Management
ARS	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau	GG	Grundgesetz
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen	ggf.	gegebenenfalls
BMS	Bauwerks-Management-System	GüKG	Güterkraftverkehrsgesetz
BMV	Bundesministerium für Verkehr	HOAI	Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung	Hrsg.	Herausgeber
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen	i	Zinsfaktor
bspw.	beispielsweise	i.d.R.	in der Regel
BVWP	Bundesverkehrswegeplan	IFK	Initial- und Folgekosten
BW	Barwert	IS	Instandsetzung
bzgl.	bezüglich	ITA	International Tunnel Association
bzw.	beziehungsweise	K	Kelvin (thermodynamische Temperatureinheit)
cd	Candela (Leuchtdichte)	Kfz	Kraftfahrzeug
d	Tag/Tage	km / tkm	Kilometer / Tonnenkilometer
d.h.	das heißt	km/h	Kilometer pro Stunde
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.	KW	Kapitalwert
DM	Deutsche Mark	KZS	Kapitalzinssatz
Doppik	Doppelte Buchführung in Konten	Lkw	Lastkraftwagen
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke	m	Meter
dyn.	dynamisch	max.	maximal
e.V.	eingetragener Verein	Mio	Million
EDV	elektronische Datenverarbeitung	Mrd	Milliarde
EK	Eigenkapital	MTTF	Mean Time to Failure
EL	Eigenleistung	MW	Megawatt
et al.	und andere	Nr./No.	Nummer
etc.	et cetera	NW	Nominalwert
EU	Europäische Union		
EW	Endwert		

ÖPP/PPP	Öffentlich Private Partnerschaft/Public Private Partnership	STUVA	Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.
OTLCC	Operational Tunnel Life-Cycle Costs	t	Zeit/Zeitpunkt/Lebensdauer
PIARC	World Road Association	TDSCG	Tunnel Design and Safety Consultation Group
Pkw	Personenkraftwagen		
PSR	Preissteigerungsrate	techn.	technisch
PTLCC	Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs	teilw.	teilweise
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln	TND	theoretische Nutzungsdauer
rd.	rund	TÜV	Technischer Überwachungsverein
RStO 01	Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen	u.a.	unter anderem
RV	Rahmenvertrag	ÜL	Übergangslösung
RZP	Referenzzeitpunkt	usw.	und so weiter
S.	Seite	UV	Ultraviolett
s.o.	siehe oben	VB	Verbesserung
SFB	Sonderforschungsbereich	vgl.	vergleiche
SIVV	Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen	VoFi	Vollständiger Finanzplan
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	z.B.	zum Beispiel
stat.	statisch	ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten

Kurzfassung

Seit den 1970er Jahren werden in Deutschland in zunehmendem Maße Straßentunnel geplant und gebaut, um ungünstige oder unsichere Straßenführungen zu verbessern. Tunnel erfordern in der Regel hohe spezifische Herstell- und Betriebskosten. Insbesondere die später anfallenden Betriebskosten wurden und werden in der Planung jedoch bestenfalls nur grob überschlägig betrachtet.

Eine restriktive Haushaltsführung der öffentlichen Hand macht es heute mehr denn je erforderlich, die Investitionen in neue und bestehende Tunnel vorausschauend zu planen. Die Anforderungen, die an eine nachhaltige Kostenplanung gestellt werden, erfüllt das Lebenszykluskostenkonzept, welches im Rahmen dieser Arbeit an die besonderen Eigenschaften der Tunnelbauwerke angepasst wird. Dabei ist der Fokus darauf ausgerichtet, unter verschiedenen technischen Planungsvarianten die Lösung mit der größten wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit zu ermitteln. Durch diesen Prozess werden die Bau- und die Betriebsphase eines Tunnels zu einer Betrachtungseinheit verknüpft und die notwendigen Voraussetzungen geschaffen, im Zuge von Variantenstudien Folge- durch Erstinvestitionen bzw. Erst- durch Folgeinvestitionen zu substituieren.

Streben Planer und Betreiber an, einen lebenszyklusorientierten Ansatz umzusetzen, so benötigen sie Kenntnisse zu den Nutzungsdauern sowie den Kosten der in einem Tunnelbauwerk vorhandenen Bauteile und Komponenten. Neben den Aufwendungen für die Erstinstallation sind Detailangaben zum Instandhaltungsaufwand, zum Energieverbrauch sowie zur Nutzungsdauer erforderlich.

Die Motivation zur Erstellung dieser Arbeit geht von der Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise zur Ermittlung und Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunneln aus. Komponentenspezifische Erst- und Folgekostenanteile werden dazu ihren genauen Entstehungszeitpunkten zugeordnet. Die Untersuchungen decken zwei praxisrelevante Szenarien ab: Der erste Fall beginnt bereits in einer frühen Phase der Tunnelneuplanung, der zweite Fall verfolgt die Zielstellung, die Lebenszykluskosten für einen Bestandstunnel zunächst zu rekonstruieren und in einem nächsten Schritt konsequent fortzuschreiben. Neben der Implementierung von betriebswirtschaftlichen Ansätzen in die Planungs- und Betriebsphase von Tunneln wird eine Methodik aufgezeigt, das Ausfallverhalten von Bauteilen und Komponenten unter Zuhilfenahme statistischer Verfahren zu interpretieren. Die auf diese Weise gewonnenen Daten tragen dazu bei, die Genauigkeit der Lebenszykluskostenprognose zu erhöhen und eine derzeit in Planungsleitfäden vorhandene Informationslücke zu schließen. Ferner wird ein Lösungsweg entwickelt, technische und ökonomische Größen, die auch über die langen Zeiträume einer Lebenszykluskostenbetrachtung mit Unsicherheiten behaftet sind, durch verschiedene Ansätze schlüssig einzugrenzen. Jede zu berücksichtigende Kostengröße kann dabei in Abhängigkeit ihres spezifischen Unsicherheitsgrades als Intervall ausgedrückt werden, so dass auch das Gesamtergebnis der Lebenszykluskostenberechnung eine zugehörige Bandbreite aufweist. Parallel zu der Berechnung der Lebenszykluskosten für das gesamte Tunnelbauwerk werden bauteilspezifische Folgekostenindizes ermittelt, die die zeitliche Entwicklung der Folge- im Verhältnis zu den Erstkosten ausdrücken.

Die erarbeiteten Ansätze sind in die Entwicklung eines softwaregestützten Tools zur Berechnung und Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunneln eingegangen. Ein Beispielprojekt dient der Erläuterung der Zusammenhänge und gibt Hilfestellung bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse. Zusammenfassend wird Planern und Betreibern von Straßentunneln ein Verfahren zur Verfügung gestellt, die Wirtschaftlichkeit zukünftiger Projekte planungsbegleitend zu analysieren und die Folgekostenstruktur bestehender Tunnelbauwerke zu überprüfen sowie nachhaltig effizienter zu gestalten.

Abstract

Since the mid 1970s, road tunnels in Germany are primarily being planned and constructed in order to improve unfavorable or unsafe routes. Tunnels are characterized by both, high specific construction costs as well as comparatively high expenditures for the operation of the facility. Especially those costs occurring in the operational phase are usually only based on a rough estimate.

A restrictive financial budgeting of the public sector requires today more than in former times to plan investments thoroughly. The life-cycle concept enables to apply a sustainable cost planning scheme. Within the scope of this research work, the life-cycle concept is being adapted to the particular properties of tunnels. At the same time the focus is directed on identifying the most economic solution among a list of feasible technical alternatives. This process merges the construction and the operational phase in order to consider it as one unit. In this way all necessary prerequisites have been established in order to examine different alternatives by substituting follow-up by initial costs and vice versa.

In terms of a life-cycle approach the designer or operator needs to be familiar with useful lives and costs of all structural parts and components in a tunnel. In addition to all expenditures for the initial installation, further indicators are required according to maintenance, energy consumption as well as concerning useful lives of components.

The motivation for this scientific work is based on the development of a systematic approach for the calculation and analysis of the life-cycle costs for road tunnels. Therefore, all costs associated with materials and technical components have to be assigned to their appropriate time of occurrence. The investigations cover two basic cases of application: The first case refers to the phase of a new tunnel design, whereas the second case aims to reconstruct the life-cycle costs of a tunnel in operation, which is followed by the extrapolation. Beside the adaptation of economic approaches into the planning and operational phase of tunnels, a statistical analysis, which is based on a recorded failure history, allows to predict the failure behavior of parts and components. The data obtained will on one side help to increase the accuracy of the life-cycle cost prediction and on the other side to close an information gap which currently exists in design guidelines. In addition, an approach is being derived how to conclusively limit and deal with uncertainties resulting from costs. Each cost increment to be introduced into the tool might be expressed as an interval, mirroring its specific grade of uncertainty. As a consequence, the calculation results are also given in terms of a spectrum. Along with the calculation of the life-cycle costs for the entire tunnel structure, a component-specific cost index expresses the time-dependant development of follow-up costs in relation to the initial costs.

The approach described above has been utilized to develop a software-based tool. In summary, planners and operators of road tunnels are given a method to analyze the profitability of future projects and to check follow-up costs of existing tunnels in order to check as well as to increase the efficiency on a long term basis.

1 Einführung

1.1 Kosten für den Bau und Betrieb von Straßentunneln

In der Bundesrepublik Deutschland existiert ein historisch gewachsenes, engmaschiges Straßennetz. Das Geflecht aus Fern-, Landes-, Kreis- und Gemeindestraßen erfüllt die Anforderungen an einen effizienten Warentransport und berücksichtigt die Ansprüche einer mobilen Gesellschaft. Neben einer Reihe weiterer Faktoren ist eine leistungsfähige Straßenverkehrsinfrastruktur eine Grundvoraussetzung dafür, dass die Volkswirtschaft prosperieren kann.

Wie der Verkehrsinvestitionsbericht des Deutschen Bundestages für das Jahr 2010 [48] dokumentiert, hat sich die Gesamtlänge des deutschen Fernstraßennetzes seit Ende der 1970er Jahren nur noch in einem sehr geringen Maße verändert. Aus dieser Tatsache kann der Schluss gezogen werden, dass der Aufbau des Fernstraßennetzes maßgeblich bis in die 1970er Jahre hinein erfolgte. Zur Bewältigung des innerhalb der letzten drei Jahrzehnte enorm angestiegenen Verkehrsaufkommens musste die Phase des Netzaufbaus durch die Phase des Netzausbaus abgelöst werden. Insbesondere Ingenieurbauwerke wie Brücken und Tunnel tragen heute dazu bei, leistungsfähige und sichere Verkehrsführungen zu schaffen.

Um eine Abgrenzung zu weiteren Ingenieurbauwerken im Straßennetz vorzunehmen, werden in der vorliegenden Arbeit Tunnelbauwerke in den Fokus gerückt. Der Bestand der Straßentunnel auf Fernstraßen der Bundesrepublik Deutschland hat sich seit den 1970er Jahren rasch entwickelt, so dass nach Knoll [113] zum 31. Dezember 2010 etwa ein Drittel der insgesamt 244 Tunnel eine bisherige Nutzungsdauer von 20 bis 40 Jahren aufweist und etwa zwei Drittel 20 Jahre oder deutlich kürzer in Betrieb sind.

Die Erstellung von Tunnelbauwerken ist sehr maschinen-, personal- und materialintensiv, so dass im Gegensatz zur Herstellung eines vergleichbar langen Straßenabschnitts im freien Gelände hohe Investitionskosten entstehen. Neben den Planungs- und Rohbaukosten müssen zu den anfänglichen Investitionen auch die Installation und Inbetriebnahme der betriebstechnischen Ausstattung hinzugerechnet werden. Der Bedarf an Ausstattungselementen in einem Straßentunnel ist dabei von der verkehrlichen Bedeutung, der Bauwerkslänge sowie von weiteren örtlichen Randbedingungen abhängig. Mit dem Ziel, einheitliche Sicherheitsstandards zu schaffen, wurde von der EU-Kommission die „Richtlinie über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz“ [66] erarbeitet und den Mitgliedsstaaten zur verbindlichen Umsetzung vorgelegt. Im Zuge der Novellierung der „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“, kurz RABT, wurden im Jahr 2006 durch die Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) [72] die Vorgaben der Kommission für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland eingeführt.

Die ebenfalls durch die FGSV publizierte „Dokumentation von Straßentunneln“ [70] beinhaltet neben einer Reihe geometrischer Kennzahlen auch eine Sammlung von Rohbau- und Ausstattungskosten für viele der bis zum Jahr 1994 fertiggestellten Straßentunnel. Für sechs ausgewählte Bauwerke gibt die Tabelle 1 die Abrechnungskosten zum Preisstand des betreffenden Fertigstellungsjahres wieder. Während in der oberen Tabellenhälfte drei Tunnel aufgeführt sind, die unter Anwendung bergmännischer Vortriebsverfahren aufgeföhren wurden, so sind die drei weiteren Tunnel entweder mit Hilfe von Absenkelementen oder in offener Bauweise erstellt worden. Die innerhalb einer Gruppe aufgeführten Tunnel weisen bezüglich Länge, Anzahl der Röhren und Ausbruchquerschnitt in etwa ähnliche Charakteristiken auf. Die Vergleichbarkeit der Kosten der zu unterschiedlichen Zeitpunkten fertiggestellten Tunnel wird erreicht, indem die Rohbau- und Ausstattungskosten unter Anwendung eines Zinssatzes von 4 % auf das Preisniveau im Jahr 2011 hochgerechnet werden. Die Wahl eines Zinssatzes in Höhe von 4 % entspricht den Empfehlungen der „Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV“ [32], welche vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwick-

lung² herausgegeben wurde. Der Vergleich wird auf Grundlage der in der letzten Tabellenspalte errechneten Kosten pro Tunnelmeter auf der Preisbasis im Jahr 2011 angestellt.

	Tunnelname, Lage im Streckennetz	Anzahl der Röhren, Länge	Preisbasis ¹⁾ Jahr 2011 [Mio €]		Preis pro Tunnelmeter und Röhre
			Rohbau	Ausstattung	
Bergmännische Bauweise	Pfaffenstein, Regensburg (A 93)	2 Röhren ¹⁾ á 880 m	89,24	11,64	~57.300 €/m
	Agnesburg, Aalen (A 7)	2 Röhren ¹⁾ á ~703 m	33,42	8,52	~29.850 €/m
	Hörnchenberg, Landstuhl (A 62)	2 Röhren ¹⁾ á ~520 m	39,26	7,06	~44.500 €/m
Offene/Sonder- Bauweise	Flughafen, Düsseldorf (A 44)	2 Röhren ²⁾ á 1.070 m	83,16	10,66	~43.850 €/m
	Ruhrschnellweg, Essen (A 40)	2 Röhren ³⁾ á 1.005 m	56,16	25,53	~40.650 €/m
	Emstunnel, Leer (A 31)	2 Röhren ³⁾ á 946 m + 507 m Rampen	223,00	38,34	~89.950 €/m

¹⁾ durch die FGSV [70] mitgeteilte Kosten unter Ansatz einer jährlichen Verzinsung von 4%

¹⁾ 2 Fahrspuren ohne Standstreifen, ²⁾ 3 Fahrspuren mit Standstreifen, ³⁾ 2 Fahrspuren mit Standstreifen

Tabelle 1: Projektspezifische Investitionskosten für Tunnelbauwerke, nach [70]

Aus der Wertesammlung in Tabelle 1 wird ersichtlich, dass die Kosten zur Erstellung eines Tunnelabschnittes von einem Meter Länge nicht innerhalb einer validen Bandbreite eingegrenzt werden können. Die projektspezifischen Randbedingungen, die zur Wahl der Tunnelbauweise und des richtlinienkonformen Ausstattungs- und Technisierungsniveaus führen, sind komplex und machen die Angabe eines durchschnittlichen Einheitspreises unmöglich. Diese These wird auch durch Untersuchungen der World Road Association (PIARC) in einer Empfehlung für die Planung und den Betrieb von Tunneln [135] bestätigt. Dennoch können auf Grundlage der in Tabelle 1 dargestellten Ergebnisse die Baukosten für eine Tunnelstrecke den Kosten für eine im Freien geführten Autobahnstrecke gegenübergestellt werden. Aus den Verkehrsinvestitionsberichten, die jährlich vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über den Deutschen Bundestag publiziert werden, gehen validierte Ansätze zu Ist-Ausgaben hervor. Eine umfangreiche Datensammlung wurde im März 2011 veröffentlicht und dokumentiert die Investitionen im Jahr 2009 [48]. Im Berichtszeitraum sind in Summe 74,7 Kilometer Autobahn mit vierspuriger Streckenführung und Standstreifen fertiggestellt worden. Für die Herstellung wurden Investitionen in Höhe von 668,6 Mio € aufgewendet. Aus diesen Angaben lässt sich ein mittlerer Neubaupreis von 8.950 € pro Meter Autobahn ermitteln. Da die letzte Spalte der Tabelle 1 Preise für einen Tunnelmeter pro Röhre enthält, muss der angegebene Neubaupreis für Autobahnen abschließend noch halbiert werden. Anders ausgedrückt, entsprechen die Investitionskosten zum Bau einer Tunnelröhre von einem Meter Länge dem Bau einer zweispurigen Richtungsfahrbahn mit Standstreifen, die nach Tabelle 1 eine Länge zwischen 7 m (= 29.850 : 4.475) und 20 m (= 89.980 : 4.475) aufweist. Implizit wird dadurch die Aussage getroffen, dass eine Tunnellösung gegenüber einer freien Streckenführung dann wirtschaftlich vorteilhaft ist, wenn eine 7- bis 20-fach längere, im offenen Gelände geführte Wegstrecke durch den Bau eines Tunnels eingespart wird. Hierbei wird jedoch ignoriert, dass Tunnelbauwerke im Verhältnis zur freien Strecke einerseits höhere Aufwendungen für den Betrieb und die Unterhaltung erfordern, andererseits infolge einer kürzeren Streckenführung für den Tunnelnutzer zeitliche und monetäre Vorteile generiert werden.

² In Abhängigkeit vom Zeitpunkt werden die folgenden Bezeichnungen verwendet:

Bundesministerium für Verkehr (BMV), ab September 1949

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen (BMVBW), ab Oktober 1998

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS), ab November 2005

Die Größenordnung der jährlichen Betriebskosten für Straßentunnel soll ebenfalls auf Grundlage der Veröffentlichung der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [70] erörtert werden. Für die schon in Tabelle 1 aufgeführten Tunnelbauwerke sind in Tabelle 2 die jährlichen Betriebskosten zu den anfänglichen Investitionskosten ins Verhältnis gesetzt worden. In Analogie zur vorherigen Vorgehensweise ist für die Adaptierung der Betriebskosten an das Preisniveau im Jahr 2011 erneut ein Zinssatz von 4 % gewählt worden. Die für den jährlichen Betrieb in Tabelle 2 genannten Aufwendungen setzen sich aus Personalkosten, Energie- und Wartungskosten für Beleuchtung, Lüftung, Leiteinrichtungen sowie für den Betrieb etwaig vorhandener Pumpwerke zusammen.

	Tunnelname, Lage im Streckennetz	Preisbasis ^{*)} Jahr 2011		Anteil der Betriebs- an den Investitionskosten
		reine Bauinvestitionen	jährlicher Betrieb	
Konventionelle Bauweise	Pfaffenstein, Regensburg (A 93)	100,9 Mio €	753 T€	0,75 %
	Agnesburg, Aalen (A 7)	41,9 Mio €	390 T€	0,93 %
	Hörnchenberg, Landstuhl (A 62)	46,3 Mio €	226 T€	0,50 %
Offene/Sonder- Bauweise	Flughafen, Düsseldorf (A 44)	93,8 Mio €	321 T€	0,34 %
	Ruhrschnellweg, Essen (A 40)	81,7 Mio €	354 T€	0,43 %
	Emstunnel, Leer (A 31)	261,3 Mio €	1.219 T€	0,47 %

^{*)} durch die FGSV [70] mitgeteilte Kosten unter Ansatz einer jährlichen Verzinsung von 4%

Tabelle 2: Projektspezifische Kosten zum Betrieb eines Tunnelbauwerks, nach [70]

Wie in Tabelle 2 gezeigt, erreichen die Kosten für den jährlichen Tunnelbetrieb annähernd die Größenordnung von 1 % der anfänglichen Investitionsausgaben für Bau und Ausstattung. Diese Größenordnung wird auch von Holst [100] bestätigt. Nach langjährigen Erfahrungen von Holst betragen die Betriebs- im Verhältnis zu den Investitionskosten in den ersten 10 bis 15 Betriebsjahren etwa 0,8 bis 1,0 %, darüber hinaus steigen sie sukzessive auf 1,5 bis 2,0 % an. Auch an dieser Stelle sollen die ermittelten Werte den Aufwendungen für die freie Streckenführung gegenübergestellt werden. Der Verkehrsinvestitionsbericht 2010 [48] führt für das Jahr 2009 pauschale Aufwendungen für Betrieb und Wartung von Bundesautobahnen auf. Demzufolge sind für Winterdienst, Grünpflege, Reinigung und Wartung in Summe 12,35 € pro Meter Straße und Fahrtrichtung aufgewendet worden. Unter Zuhilfenahme des mittleren Neubaupreises von 4.475 € pro Meter zur Erstellung eines Autobahnabschnitts mit zwei Fahr- und einem Standstreifen beträgt der Anteil der Betriebs- an den Investitionskosten für die offene Streckenführung rund 0,28 % (= 12,35 : 4.475).

Zu den regelmäßig anfallenden Betriebskosten müssen noch Aufwendungen für die substanzielle Erhaltung eines Bauwerks hinzugerechnet werden. Kann ein Einbauteil oder eine technische Komponente im Tunnel, z.B. ein an der Decke installierter Strahlventilator, eine Absperreinrichtung am Portal oder eine Beleuchtungseinheit, nach Feststellung einer Funktionsbeeinträchtigung wieder in einen betriebsfähigen Zustand versetzt werden, so handelt es sich um eine Instandsetzung. Bei irreparablen Funktionsausfall wird hingegen ein Bauteilaustausch erforderlich. Exemplarisch seien die Erneuerung eines abgenutzten Fahrbahnbelages oder der Austausch der Tunnelleit- und Steuerungstechnik genannt.

Nach Artikel 90, Absatz (1) des Grundgesetzes [23] ist der Bund Eigentümer der Bundesautobahnen und Bundesstraßen. Im Auftrag des Bundes, so weiter in Absatz (2), verwalten die Länder oder die nach Landesrecht zuständigen Selbstverwaltungskörperschaften diese als Bundesfernstraßen benannten Streckenabschnitte. Die jährlich im Vorhinein im Bundeshaushalt für Neubau-, Betriebs- und Erhaltungsaufwendungen festgelegten Mittel werden nach Schröter [146] in die Etats der Bundesländer integriert. Vor dem Hintergrund, dass das Bundesfernstraßennetz unterschiedliche Ausbaustandards aufweist, gewinnt nach Darstellung des BMVBS in [48] der Erhalt der baulichen Substanz sowie die Aufrechterhaltung der Nutzungsfähig-

keit immer mehr an Bedeutung. Im Bereich der Ingenieurbauwerke sind vor allem für einige hochbelastete Brücken die Traglastreserven bereits oder in naher Zukunft aufgebraucht. Aufgrund der recht jungen Altersstruktur der Tunnelbauwerke ist nicht davon auszugehen, dass Straßentunnel außer Betrieb gestellt und ersetzt werden müssen, dennoch steht die Erneuerung der Betriebstechnik in vielen Tunneln in den nächsten Jahren an. Aufgrund erhöhter sicherheitstechnischer Anforderungen findet zudem derzeit eine umfangreiche Nachrüstung von Straßentunneln statt.

Peil und Hosser [131] prognostizieren, dass das Bauwesen eine nachhaltige Strukturveränderung erfahren wird. Auslöser dafür sind zum einen die Alterung bestehender Bauwerke, zum anderen die Weiterentwicklung technischer Standards. Über einen Zeitraum, der mehrere Jahrzehnte umfasst, so Peil und Hosser [131] weiter, wird die Umlagerung der Investitionen von Neubau- auf Erneuerungs- und Erhaltungsinvestitionen zu beobachten sein. Peil und Hosser bezeichnen den erforderlichen Erneuerungsbedarf als „eine schwere Zukunftshypothek“. Insbesondere eine verbesserte Bauwerksüberwachung kann nach ihrer Meinung dazu beitragen, verbleibende Nutzungsdauern sehr viel genauer vorherzusagen und die Notwendigkeit von Anschlussinvestitionen besser planen zu können.

Der zweite Bericht über Schäden an Bauwerken der Bundesverkehrswege [37] bestätigt die zuvor wiedergegebenen Thesen. Explizit wird in [37] die Forderung aufgestellt, dass zur Entlastung der öffentlichen Haushalte die Entwicklung und Verbesserung von Methoden zur Vorhersage des künftigen Erhaltungsbedarfs von Brücken- und Ingenieurbauwerken dringend erforderlich sind. Hierzu zählen langfristige Beobachtungen von Baustoffen, Bauweisen und Bauverfahren sowie die Entwicklungen von Methoden zur hinreichend genauen Prognose von Restnutzungsdauern.

1.2 Problemstellung

Untersuchungen von Staudt et al. [151] sowie von Braschel und Hetzer [12] zeigen, dass die Summe der Kosten für Betrieb und Instandhaltung einer Immobilie bereits ein Jahrzehnt nach Inbetriebnahme die gesamten Ersterstellungskosten überschreiten können. Insbesondere Besitzer und Betreiber von Immobilien benötigen jedoch zur Erzielung einer Rendite eine genaue Beurteilung der Kosten und Erlöse, die langfristig mit dem Bauwerk in Verbindung stehen. Aus diesem Grund hat sich die Analyse der Lebenszykluskosten im Immobiliensektor innerhalb der letzten Jahre etabliert.

Eine vergleichsweise wenig entwickelte Vorgehensweise beim Umgang mit Kosten existiert für die Ingenieurbauwerke des Tiefbaus. Die Berechnung der Lebenszykluskosten hat sich für diese Bauwerksart trotz zunehmend zu verzeichnender Forschungsaktivitäten in der Praxis noch nicht durchgesetzt. Dabei geht der grundsätzliche Lebenszykluskostengedanke davon aus, dass alle wesentlichen Richtungsentscheidungen, die den zukünftigen Betrieb eines Ingenieurbauwerks beeinflussen, bereits in der Planungsphase getroffen werden. Insbesondere für Bauwerke, die sich in der Baulast der Öffentlichen Hand befinden, muss in den nächsten Jahren zur Schonung der Haushalte ein konsequenter Philosophiewechsel vollzogen werden. Dass die Lebenszykluskostenanalyse im öffentlichen Sektor bisher kaum Beachtung findet, kann auch damit erklärt werden, dass die Erzielung einer Rendite aufgrund des hohen Stellenwerts der Kostenseite als irrelevant erachtet wird und die langjährig von der Öffentlichen Hand als etabliert angesehenen Methoden wenig Veranlassung für ein Umdenken oder für die Einführung von Innovationen bieten.

Innerhalb der letzten Jahrzehnte sind auch als Folge der deutschen Wiedervereinigung bei der Finanzierung der Straßeninfrastruktur die Ausgaben für Betrieb und Unterhaltung nicht in dem Maße angestiegen, wie die Ausgaben für Neu- und Ausbaumaßnahmen. Insgesamt hat diese Finanzierungspraxis dazu geführt, dass sich das Defizit bei der Erhaltung von Bestandsbauwerken weiter vergrößert hat. Als Folge von Etatkürzungen und leeren Staatskassen wird die Erhaltung von Bauwerken heute in der Regel nur dort durchgeführt, wo der Bedarf am vordringlichsten ist. Dies hat zur Folge, dass erforderliche Maßnahmen zur Erhaltung ei-

nes Bauwerks auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden und das Schadensausmaß infolge weiterer Nutzung überproportional zunimmt. Zu einem späteren Zeitpunkt stellt sich die längst überfällige Instandhaltung sehr viel aufwendiger dar, als sie zu einem früheren Zeitpunkt gewesen wäre.

Aufgrund bisher fehlender Ansätze soll das Lebenszykluskonzept im Rahmen dieser Arbeit an Straßentunnel adaptiert werden. Dazu müssen die Charakteristiken von Tunnelbauwerken herausgearbeitet und in den Bearbeitungsprozess integriert werden. Weil nicht nur die Errichtung, sondern auch der Betrieb und die Unterhaltung von Tunneln sehr kostenintensiv sind, ist ein strukturierter Umgang mit den zu erwartenden Kosten erforderlich. Vor dem Hintergrund einer nachhaltigen Planung und Bauausführung von Tunnelbauwerken sind im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung in den letzten Jahren Leitfäden und Richtlinien erarbeitet worden. Diese unterteilen bauliche, betriebliche und organisatorische Aspekte und bieten Ansätze, die zur Entlastung öffentlicher Kassen beitragen können. Eine umfassende Methodik, die die Verkettung von Planungs-, Bau- und Betriebsphase eines Tunnels ermöglicht, existiert jedoch bisher nicht.

Aus der erläuterten Problematik wird ersichtlich, dass auf Bauteilebene der Zeitpunkt zu ermitteln ist, zu dem unter ökonomischen Gesichtspunkten eine korrektive Maßnahme am effizientesten durchzuführen ist. Sind die in ein Tunnelbauwerk integrierten Baustoffe und Bauteile sowie deren Expositionen gegenüber externen Einflüssen bekannt, so müssen vertiefte Kenntnisse der Lebensdauerprognose zur Anwendung kommen. In einem darauffolgenden Schritt sind die bauteilspezifischen Kosten für Erstinvestition, Betrieb, Wartung, Reparatur und Austausch abzuschätzen. Unter Beachtung der zeitlichen Entwicklung monetärer Einheiten sind alle zuvor genannten Einflüsse in ein geeignetes Analysemodell zu implementieren.

1.3 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit verfolgt die Zielstellung, die Interaktion von Entscheidungen, die die Planung und den Betrieb eines Straßentunnels betreffen, unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufzuzeigen. Dazu gehört es, maßgebliche Prozesse, wie z.B. das Abnutzungsverhalten von Bauteilen und technischen Komponenten zu beschreiben, Verknüpfungen auf Bauwerksebene aufzuzeigen und die durch einzelne Prozesse hervorgerufenen Konsequenzen monetär auszudrücken.

Aus dem vorangestellten Absatz wird ersichtlich, dass neben der Ingenieurdisziplin für die technische Durchbildung eines Tunnelbauwerks weiteres Expertenwissen für die Bewertung der wirtschaftlichen Auswirkungen benötigt wird. Beide Prozesse – gemeint sind die technische und die monetäre Planung – müssen zeitgleich erfolgen und als Ergebnis eines iterativen Prozesses das wirtschaftliche Optimum hervorbringen. Voraussetzung für die Erreichung dieser Zielstellungen ist es, dass die gesamte angestrebte Nutzungsdauer eines Bauwerks in einem Rechenmodell abgebildet wird. Das beschriebene Vorgehen wird in der Betriebswirtschaftslehre als lebenszykluskostenorientierter Ansatz bezeichnet.

Neben dem Hauptziel der Entwicklung eines Berechnungsalgorithmus zur Analyse und Visualisierung der Lebenszykluskosten von Straßentunneln sind die folgenden Einflüsse einer detaillierten Betrachtung zu unterziehen:

- Identifizierung der erforderlichen Bauteile und Komponenten eines Straßentunnels einschließlich der Angabe zu mittleren Nutzungsdauern und spezifischen Instandhaltungsanforderungen und -taktiken,
- Entwicklung einer Systematik, die die statistische Auswertung dokumentierter Bauteilausfälle ermöglicht und Ansätze zur Interpretation und Weiterverwertung der Ergebnisse vorgibt,
- konsequente Aufgliederung von Kosten nach Art und Entstehungszeitpunkt,
- Diskussion der Parameter, die für die Anwendung der Verfahren der Investitionsrechnung benötigt werden,

- Prüfung der in die Lebenszykluskostenanalyse eingehenden Parameter hinsichtlich ihrer Schwankungsbreiten bzw. der Bewertung von Unsicherheiten.

Die Zielgruppe, von der die zu entwickelnde Systematik zur Analyse der Lebenszykluskosten Anwendung finden soll, wird aus Bauherrn, Bauwerksbetreibern und aus Fachabteilungen in Baukonzernen gebildet. Die folgenden Anwendungsszenarien sind dabei inhaltlich abzudecken:

- Visualisierung der grundsätzlichen Zusammenhänge der lebenszyklusorientierten Planung; die Entwicklung der Lebenszykluskosten wird sowohl auf Komponentenebene als auch für das gesamte Tunnelbauwerk aufgezeigt,
- Unterstützung der Planung für einen Tunnelneubau; hierbei ist zwischen alternativen Planungskonzepten auf Grundlage der prognostizierten Bau-, Erhaltungs- und Sanierungskosten eine Realisierungsentscheidung zu treffen,
- Für ein Tunnelprojekt, das auf einer Öffentlich Privaten Partnerschaft beruhen soll, ist unter der Annahme von Kosten und Erlösen über die Dauer des Lebenszyklus die Höhe einer Anschubfinanzierung durch die öffentliche Hand zu ermitteln,
- Entwicklung eines praxistauglichen Berechnungstools, das als Lebenszykluskosten-Management-Instrument während der Betriebsphase eines Tunnels zum Einsatz kommen kann. In einer frühen Projektphase werden Soll-Kostenwerte implementiert, die im Laufe der Zeit durch Ist-Werte ersetzt werden. Dieses führt dazu, dass die Lebenszykluskostenanalyse fortgeschrieben wird; mit Erhöhung der Anzahl der in das Modell implementierten Beobachtungsdaten erhöht sich folglich auch die Prognosegenauigkeit.

1.4 Gliederung der Arbeit und wissenschaftliches Vorgehen

Um die in Abschnitt 1.3 beschriebenen Ziele zu erreichen und um den Fokus der Arbeit in den Gesamtkontext einordnen zu können, enthalten die Kapitel 2 und 3 die für das weitere Verständnis erforderlichen Grundlagen. Kapitel 2 hebt die verkehrliche Bedeutung von Straßentunneln hervor und gibt die Entwicklung der in Tunnelbauwerken verwendeten Investitionen im Verhältnis zu den Gesamtinvestitionen in das Bundesfernstraßennetz über einen Zeitraum von 40 Jahren wieder. Anhand dieser Werte soll darüber hinaus aufgezeigt werden, in welche Anteile sich die Kosten für Betrieb, Unterhaltung und Instandhaltung von Tunneln untergliedern und nach welchen Prinzipien Investitionsentscheidungen getroffen werden. Abschnitt 2.5 gibt einen Überblick zu den derzeit gültigen Regelwerken und Richtlinien, die bei der Planung, dem Bau und dem Betrieb von Straßentunneln zu berücksichtigen sind. Die inhaltliche Kurzfassung der Regelwerke erfolgt insbesondere vor dem Hintergrund, Aspekte der wirtschaftlichen Planung und des effektiven Tunnelbetriebs in den Vordergrund zu stellen.

Das Kapitel 3 ist mit „Der Lebenszyklusgedanke – vom Ursprung bis zur Anwendung in der Bauwirtschaft“ überschrieben und erläutert das Konzept vom Bauwerkslebenszyklus. Dabei wird auf die Keimzelle des Bauwerkslebenszyklus, das in der Betriebswirtschaftslehre entwickelte Konzept vom Produktlebenszyklus zurückgegriffen. In Abschnitt 3.3.2 werden die einzelnen charakteristischen Phasen eines Projektes den Lebenszyklusphasen zugeordnet. Als Ausdruck des Abnutzungsverhaltens von Baustoffen und Bauteilen wird in Abschnitt 3.4 die technische von der wirtschaftlichen Nutzungsdauer abgegrenzt und der Begriff der theoretischen Nutzungsdauer eingeführt. Als maßgeblicher Gradmesser zur Beurteilung der gesamten Lebenszykluskosten werden in Abschnitt 3.5.1 die Kosten eingeführt. Diese lassen sich nach Erst- und Folgekosten mit entsprechenden Unterkategorien differenzieren. In Abhängigkeit von der Phase, ab der die Lebenszykluskostenanalyse für ein Projekt durchgeführt werden soll, besitzt die Beeinflussbarkeit der Kosten, wie in Abschnitt 3.5.4 aufgezeigt, unterschiedlich ausgeprägte Potenziale. Aus dieser Überlegung resultiert

in Abschnitt 3.5.5 die Benennung der Vorteile, die für den Bauherrn und/oder den späteren Betreiber mit der Wahl einer lebenszykluskostenorientierten Herangehensweise verbunden sind.

Die Kapitel 4 bis 6 sind der Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunneln gewidmet. In Kapitel 4 werden sämtliche Kriterien identifiziert und bewertet, die sich auf die Analyse der Lebenszykluskosten auswirken. Dazu gehören einerseits die Kostenverursacher der Baustoff- und Bauteilebene, andererseits die Diskussion von Unsicherheiten und Unschärfen, die im Zusammenhang mit der Vorgabe von Kosten stehen. Für die einzelnen, in die Analyse der Lebenszykluskosten eingehenden Parameter werden in Abschnitt 4.4.5 geeignete Empfehlungen vorgegeben.

Die Entwicklung eines Modells zur Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunneln ist Inhalt des fünften Kapitels. In Abschnitt 5.2 werden die Randbedingungen definiert, unter denen die Aufstellung des Modells erfolgen soll. Insbesondere betrifft dies den Umfang der Leistungsfähigkeit sowie die Wahl eines geeigneten Verfahrens der Investitionsrechnung. Desweiteren wird in Abschnitt 5.3 der Begriff der Modultabelle eingeführt. Modultabellen dienen der Eingabe aller für die Berechnung relevanten Inputparameter sowie der Ausgabe der Ergebnisse. Das auf Basis einer Tabellenkalkulation entwickelte Berechnungstool beinhaltet verschiedene Modultabellen und ermöglicht darüber hinaus, die in Abschnitt 5.4 beschriebenen Berechnungsalgorithmen auszulösen. In den Abschnitten 5.5 und 5.6 werden zwei konkrete Anwendungsmöglichkeiten der Lebenszykluskostenanalyse aufgezeigt. Im ersten Fall handelt es sich um die Modellvariante PTLCC (Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs), die die Analyse der Kosten eines neu zu errichtenden Tunnels ab einer frühen Planungsphase umfasst. Soll hingegen ein Bestandstunnel im Modell abgebildet werden, so ist davon auszugehen, dass im Vergleich zur anfänglichen Planung eines Tunnel eine wesentlich umfangreichere Sammlung dokumentierter Werte vorliegt. Für den zweiten Fall kommt die mit OTLCC (Operational Tunnel Life-Cycle Costs) bezeichnete Modellvariante zur Anwendung.

Das sechste Kapitel umfasst die Analyse der Lebenszykluskosten für einen Tunnel, der bereits im Jahr 1995 in Betrieb gegangen ist. Den Anlass der Abbildung des als Modelltunnel bezeichneten Bauwerks stellt die Durchführung von Nachrüstungs- und Sanierungsarbeiten im Jahr 2012 dar. Auf die Beschreibung des Modelltunnels und die Spezifizierung der Eingangsparameter in den Abschnitten 6.2 und 6.3 erfolgt die Beschreibung der Eingaben in die OTLCC-Berechnungsdatei. Abschließend werden die Ergebnisse vorgestellt und interpretiert. Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2 Tunnel im Straßennetz

2.1 Verkehrliche Bedeutung

Tunnel sind nach DIN 1076 [52] „dem Straßenverkehr dienende Bauwerke, die unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche liegen und in geschlossener Bauweise hergestellt werden oder bei offener Bauweise länger als 80 m sind“. Im Einzelnen werden darüber hinaus nach DIN 1076 die folgenden Bauwerke ab einer Länge von 80 m als Straßentunnel bezeichnet:

- „Teilabgedeckte unter- oder oberirdische Verkehrsbauwerke (z.B. mit längsgeschlitzten Decken, Rasterdecken),
- oberirdische Einhausungen von Straßen (z.B. Lärmschutzeinhausungen),
- Kreuzungsbauwerke mit anderen Verkehrswegen,
- Galeriebauwerke.“

Zugleich gehören im Sinne der DIN 1076 zu einem Straßentunnelbauwerk auch die für den Bau und den Betrieb erforderlichen Nebenanlagen, soweit sie baulich integrierte Bestandteile sind. Nebenanlagen, die für den Bau eines Tunnels erforderlich sein können, sind beispielsweise Anlagen für die bauzeitliche Grundwasserhaltung oder geotechnische Messeinrichtungen, die eine kontinuierliche Bauwerksüberwachung gewährleisten. Unerlässlich für den Betrieb eines Tunnels sind Nebenanlagen wie Betriebsräume zur Behausung betriebstechnischer Steuer- und Überwachungseinheiten oder die Errichtung von Fluchtwegen, die von den Tunnelnutzern im Ereignisfall selbstständig oder auf Anweisung aufzusuchen sind.

Die Entwicklung des Tunnelbestandes auf Bundesfernstraßen zwischen 1965 und 2010 geht in Anlehnung an Knoll [113] aus Abbildung 1 hervor. Bundesfernstraßen bilden nach Definition des Bundesfernstraßengesetzes (FStrG) [20] ein zusammenhängendes Verkehrsnetz öffentlicher Straßen und dienen dem weiträumigen Verkehr. Dieses Netz besteht aus Bundesstraßen und Bundesautobahnen, wobei der Straßenbaulastträger den Bau, die Erneuerung und die Erhaltung hoheitlich finanziert. Die Straßenbaulast für die Bundesfernstraßen liegt – mit Ausnahme von Bundesstraßen, die durch Ortschaften mit mehr als 80.000 Einwohnern führen – beim Bund.

Aus Abbildung 1 wird ersichtlich, dass Anzahl und Gesamtlänge der Tunnel auf Bundesfernstraßen etwa seit Beginn der 1970er Jahre stetig an Bedeutung gewinnen. Neben der Entwicklung der Gesamtanzahl an Tunneln ist als weitere Größe auf der linken Ordinate die Gesamtröhrenlänge zum Jahresende aufgetragen. Für Straßentunnel, die aus zwei oder mehr Röhren bestehen, wurden zur Ermittlung der zweiten Größe die Einzellängen aller Röhren aufsummiert. Bei der Bestimmung der auf der rechten Ordinate aufgetragenen durchschnittlichen Tunnellänge wurde hingegen unabhängig von der Anzahl der parallel verlaufenden Röhren für jedes Bauwerk ein Mittelwert aus den Einzelröhrenlängen berechnet. Diese Betrachtungsweise verdeutlicht, dass nicht nur die Gesamtanzahl der Tunnel zunimmt, sondern auch die durchschnittliche Bauwerkslänge eine prägnante Erhöhung aufweist. Insbesondere für die ab dem Jahr 1999 fertiggestellten Tunnel erhöht sich die durchschnittliche Länge von 435 m auf 618 m zum Jahresende 2010. Dieser Trend lässt sich darauf zurückführen, dass beispielsweise eine Kette langer Tunnel auf der Bundesautobahn 71 in Thüringen, der Engelberg Basistunnel in Baden-Württemberg, der Wesertunnel in Niedersachsen oder eine Reihe von langen Autobahntunneln in Sachsen fertiggestellt und in Betrieb genommen wurden.

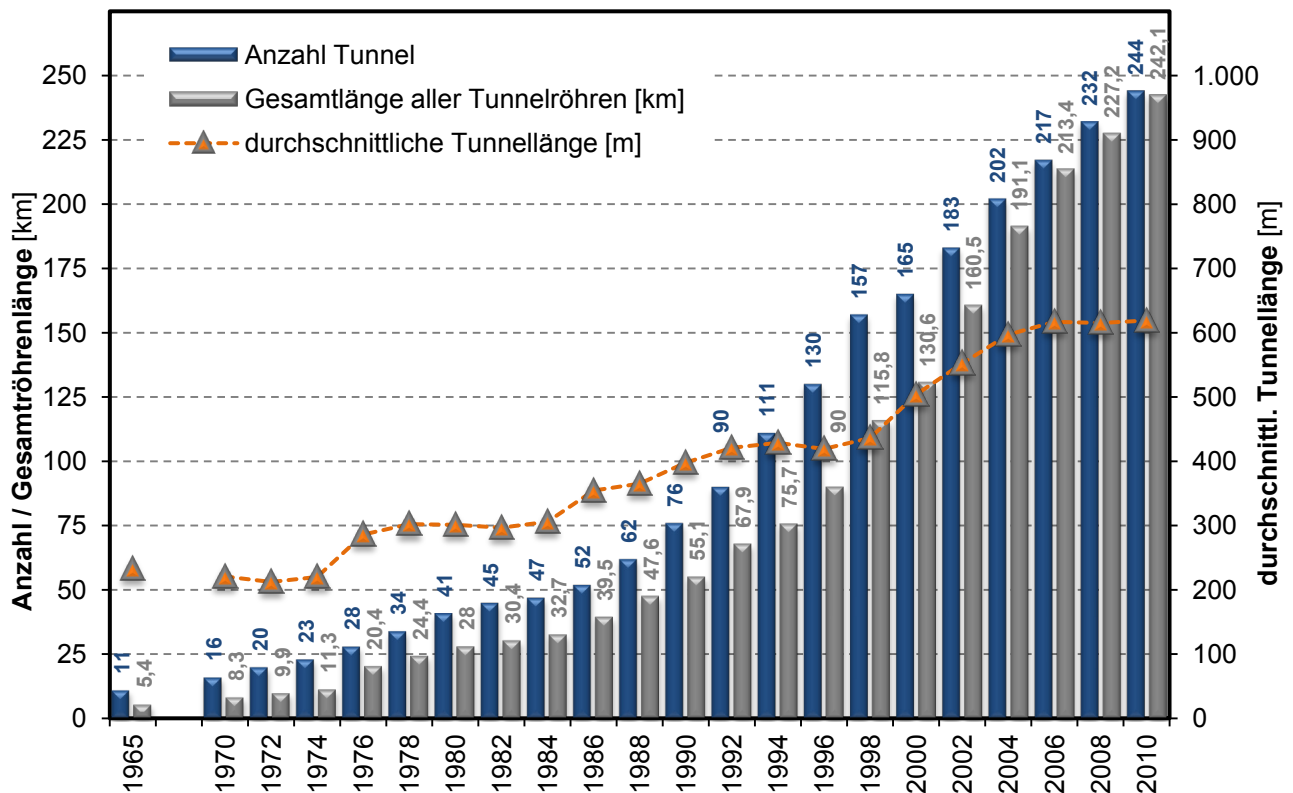
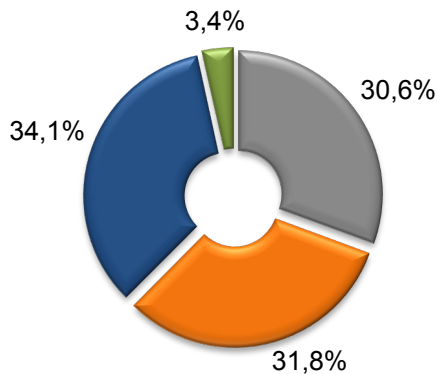
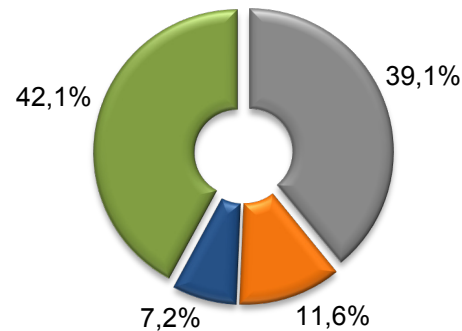
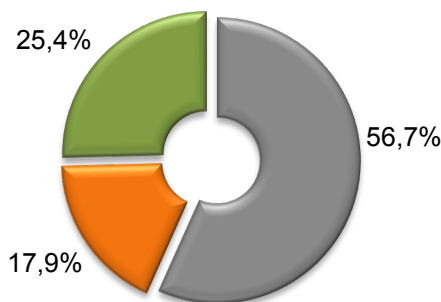
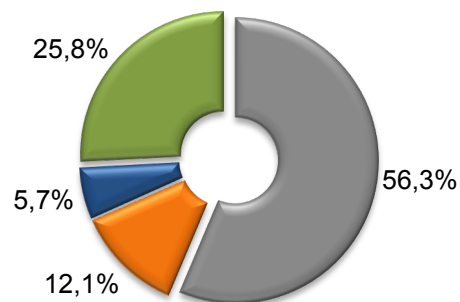


Abbildung 1: Tunnel der Bundesfernstraßen – Bestand nach Anzahl und Länge, nach [113]

Der im Jahr 2008 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung vorgelegte Verkehrsinvestitionsbericht [48] führt auf, dass sich Ende 2007 auf Bundesfernstraßen weitere 26 Tunnel in Bau befinden. Zusätzlich durchlaufen mehrere Tunnelbauprojekte frühe oder fortgeschrittene Planungsphasen. Haack und Schäfer [91] konkretisieren, dass zum Jahreswechsel 2010/2011 insgesamt 173 km Straßentunnel mindestens das Stadium der Planfeststellung erreicht haben, weitere etwa 80 Kilometer befinden sich in weniger weit vorangeschrittenen Planungsphasen.

Zur Erstellung der Abbildung 2 ist über vier Perioden – meist handelt es sich um ein Jahrzehnt – die Zweckbestimmung der Tunnel der Bundesfernstraßen ausgewertet worden. Durch die Bundesanstalt für Straßenwesen [17] wurde freundlicherweise eine zur Auswertung geeignete Datengrundlage zur Verfügung gestellt. Aus den Daten lassen sich vier Zweckbestimmungsklassen für Tunnel ableiten, nämlich die Durchfahrung von Höhenrücken, die Unterfahrung von Gewässern und Verkehrswegen sowie die Realisierung von Tunneln aus Gründen des Umweltschutzes. Die den einzelnen Klassen in Abbildung 2 zugeordneten Prozentsätze beziehen sich auf die im spezifizierten Zeitraum fertiggestellten Tunnelstrecken. Für den Fall, dass ein Tunnel aus mehreren Verkehrsröhren besteht, wurde die Gesamtlänge aller Röhren für die Auswertung genutzt. Es wird deutlich, dass sich der Anteil zum Neubau von Tunneln zur Durchfahrung von Höhenrücken kontinuierlich weiter erhöht hat. Während in den 1980er Jahren Tunnel überwiegend aus Umweltschutzgründen errichtet wurden, so hat sich dieser Anteil bis auf etwa 25 % reduziert. Der Anteil der Tunnel zur Unterfahrung kreuzender Verkehrswege und Gewässer bewegt sich seit den 1980er Jahren etwa auf einem Niveau von 18 %.

bis 1979**1980 bis 1989****1990 bis 1999****2000 bis 2009**

- Durchfahrung Höhenrücken
- Unterfahrung Verkehrswege
- Unterfahrung Gewässer
- Umweltschutz

Abbildung 2: Zweckbestimmung der Tunnel auf Bundesfernstraßen nach Fertigstellung in den angegebenen Zeiträumen, nach [17]

Während einzelne Bahntunnel in Deutschland bereits seit über 100 Jahren in Betrieb sind, blickt der Straßentunnelbau erst auf ein knappes halbes Jahrhundert zurück. Diese Entwicklung lässt sich damit begründen, dass der Verzicht auf den Bau eines Tunnels bedeutete, eine alternative, wenn auch längere Streckenführung im Freien in kürzerer Zeit realisieren zu können. Im Bahnbau sind durch begrenzte Leistungsfähigkeiten von Lokomotiven maximale Streckensteigungen und Mindestkurvenradien einzuhalten, so dass Tunnelbauwerke mangels alternativer Trassenführungen schon sehr viel früher in das Streckennetz eingebunden wurden.

Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV in Kfz je 24 Stunden) ist in Deutschland von 1990 bis 2008 nach Mitteilung des BMVBS [31] auf Autobahnen von 41.800 auf 48.800 und auf Bundesstraßen von 9.010 leicht auf 9.140 angestiegen. Abbildung 3 veranschaulicht auf Grundlage einer in [161] mitgeteilten Auswertung der Bundesanstalt für Straßenwesen die in Klassen zusammengefasste, durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Straßentunneln in Deutschland. Die Tunnel, die einen hohen DTV-Wert aufweisen, sind im Verlauf einer Autobahnstrecke anzutreffen, pro Fahrtrichtung stehen dabei zwei oder mehr Fahrstreifen zur Verfügung. Handelt es sich bei Autobahntunneln ausnahmslos um Richtungsverkehrstunnel, so sind Tunnel auf Bundesstraßen aufgrund eines erheblich geringeren Verkehrsaufkommens zumeist als Gegenverkehrstunnel ausgebildet. Neben der Höhe der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke beeinflusst nach BMVBW [34] die Anzahl der Richtungsfahrbahnen, die auf ein Tunnelbauwerk zulaufen, ob ein Tunnel als Richtungs- oder als Gegenverkehrstunnel realisiert wird.

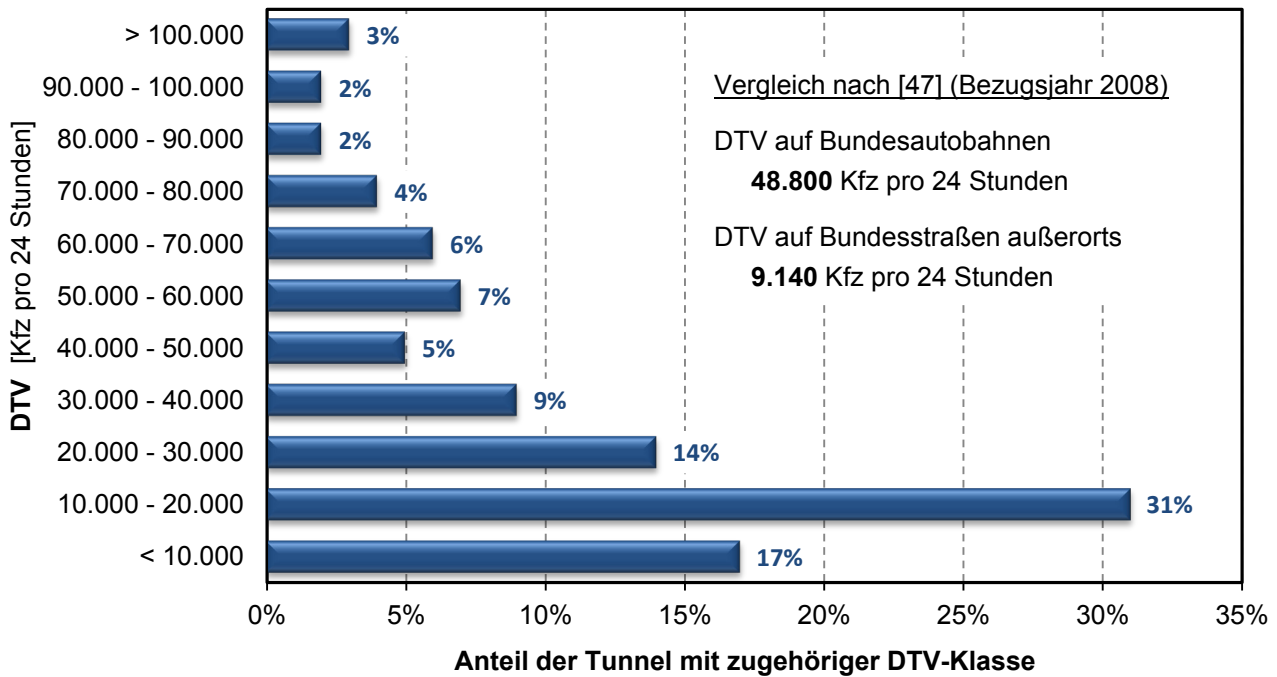


Abbildung 3: DTV-Klassen von Straßentunneln auf Bundesfernstraßen, nach [161], [48]

Auch aus der Gegenüberstellung zwischen der jährlichen Güterverkehrsleistung und der Entwicklung der Länge des überörtlichen Wegenetzes können auf Grundlage der Datensammlung „Verkehr in Zahlen 2009/2010“ [31] wichtige Erkenntnisse für den Bau und den Betrieb von Straßentunneln abgeleitet werden. Wie aus Abbildung 4 hervorgeht, hat sich die Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs in Deutschland zwischen 1991 und 2008 von etwa 246 Milliarden Tonnenkilometern (Mrd tkm) auf rund 473 Mrd tkm annähernd verdoppelt. Während der Werkverkehr, dies ist nach dem Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG) [24] der Güterkraftverkehr für eigene Zwecke eines Unternehmens, leicht an Bedeutung verloren hat, ist die durch deutsche Lastkraftfahrzeuge erbrachte Leistung gegenüber dem Jahr 1991 um den Faktor 1,96 gestiegen. Mehr noch hat der Anteil ausländischer Lastkraftfahrzeuge auf deutschen Verkehrswegen zugenommen, der Steigerungsfaktor zwischen 1991 und 2008 beträgt 2,45. Im gleichen Zeitraum hat sich die Länge der Bundesautobahnen um etwa 1.700 km auf insgesamt 12.718 km erhöht, die Länge der Bundesstraßen hat sich hingegen um rund 1.900 km auf 40.203 km verringert. Teilweise ist diese Entwicklung, so das BMVBS in [48] auf den Neubau von Autobahnen im Zuge der Umsetzung der „Verkehrsprojekte Deutsche Einheit“ zurückzuführen. Zeitgleich sind Bundesstraßen in einen anderen Straßentypus hoch- oder abgestuft worden. Insgesamt stagniert demzufolge die Gesamtlänge der Bundesfernstraßen zwischen 1991 und 2008 bei etwa 53.000 km. Bei dem geschilderten Sachverhalt darf allerdings nicht übersehen werden, dass erhebliche Investitionen in den Kapazitätsausbau der Bundesfernstraßen, beispielsweise zur Entzerrung von Knotenpunkten oder zur Ergänzung einer weiteren Fahrspur, geflossen sind. Diese Maßnahmen spiegeln sich freilich in der Gesamtnetzlänge nicht wider. Das Landes- und Kreisstraßennetz, dem bezüglich des Güterkraftverkehrs eine verteilende Funktion zukommt, ist, wie in Abbildung 4 dargestellt, zwischen 1991 und 2008 von 173.000 auf 178.000 bzw. leicht angestiegen.

Obwohl der Anteil der Bundesfernstraßen am gesamten überörtlichen Straßennetz – hierzu gehören neben den Bundesfernstraßen auch die Landes- und Kreisstraßen – nur etwa 23 % beträgt, bewältigen sie nach Angaben des Bundesrechnungshofes [38] rund 56 % des Personen- sowie fast drei Viertel des Güterkraftverkehrs. Autobahnen, die nur etwa zu 5,5 % zum gesamten Streckennetz beitragen, übernehmen rund ein Drittel der gesamten Jahresfahrzeugleistung der Kfz.

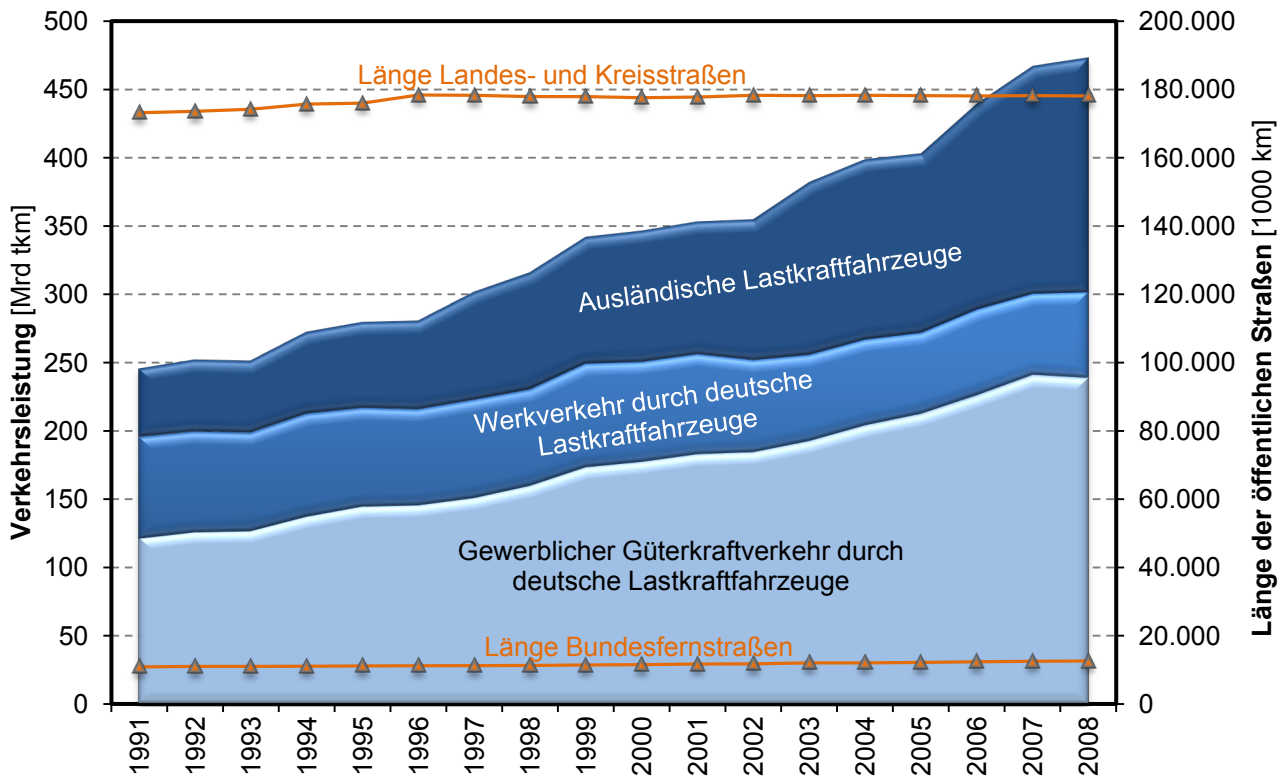


Abbildung 4: Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs und Länge des Straßennetzes zw. 1991 und 2008, nach [31]

Wie die Überprüfung der Bedarfspläne für die Bundesfernstraßen durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [28] im Jahr 2010 ergeben hat, ist insbesondere im Güterverkehr weiterhin von einem starken Wachstum der Verkehrsleistung auszugehen. Auf Grundlage der Güterverkehrsleistung aus dem Jahr 2004 wird bis zum Jahr 2025 eine Zunahme um 84 % erwartet. Es zeigt sich die Tendenz zu längeren Transportwegen aufgrund fortschreitender Globalisierung und einer damit verbundenen Zunahme der Arbeitsteilung; dies spiegelt sich dadurch wider, dass der grenzüberschreitende Verkehr eine weitaus stärkere Wachstumsdynamik als der Binnenverkehr aufweist. Es wird prognostiziert, dass im Jahr 2025 knapp 57 % der Verkehrsleistung im grenzüberschreitenden Güterverkehr erbracht wird. Auch für den motorisierten Individualverkehr werden zwischen 2004 und 2025 trotz einer angenommenen Abnahme der Einwohnerzahl in Deutschland von 1 % und einer Verschiebung der Altersstruktur zugunsten der älteren Jahrgänge Zuwächse in der Größenordnung von 16 % erwartet.

Demzufolge werden die im Straßennetz vorhandenen Tunnel in den nächsten Jahrzehnten eine signifikante Steigerung der Verkehrsbelastung erfahren. Straßentunnel stellen – ähnlich wie Brücken – Engpässe im Straßenverkehrsnetz dar, Entlastungs- oder Umleitungsstrecken sind in der Regel nicht vorhanden oder haben eine vergleichsweise geringe Leistungsfähigkeit. Eine hohe Verfügbarkeit bzw. eine Bewältigung der prognostizierten Verkehrsströme im Hinblick auf diese Engstellen ist anzustreben, anderenfalls kommt es zu Kapazitätsengpässen im überregionalen Verkehrsnetz. Steht ein Tunnelbauwerk im Streckennetz nicht zur Verfügung, sind erhebliche Mehrreisezeiten und eine zusätzliche Belastung von Natur und Mensch durch Abgas- und Lärmimmissionen die Folge. Vor dem Hintergrund, dass es sich bei Tunnelprojekten um sehr langwierige Planungsverfahren, mehrjährige Bauaktivitäten sowie um hohe Investitionssummen handelt, muss aus einer Bedarfsanalyse ein Konzept für die Sicherstellung der geforderten Verfügbarkeit innerhalb festgelegter Fristen erfolgen.

Ändern sich beispielsweise das durchschnittliche tägliche Verkehrsaufkommen oder der Güterverkehrsanteil in einem Tunnel, können sicherheitstechnische Nachrüstungen oder der Bau einer zusätzlichen Röhre erforderlich werden. Hier sehen die Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln, kurz RABT [72], eine systematische Ermittlung des erforderlichen sicherheitstechnischen Ausstattungsniveaus in Abhängigkeit von der Tunnellänge, der Verkehrsstärke pro Fahrstreifen und der zulässigen Geschwindigkeit vor. Die RABT unterscheiden zwischen Mindest-, Grund- und erweiterter Ausstattung; eine direkte Abhängigkeit besteht zwischen dem jeweiligen Ausstattungsniveau und der Steuerung der Überwachung des Verkehrsflusses vor und im Tunnel.

Aus einer erhöhten Verkehrsbelastung in einem Tunnel resultiert zudem ein verändertes Abnutzungsverhalten der Baustoffe, Bauteile und technischen Komponenten. Dieses hat Auswirkungen auf das Instandhaltungsmanagement. Beispielhaft soll dies für den Fahrbahnaufbau erläutert werden, wobei die folgenden Ausführungen auch auf die freie Streckenführung übertragen werden können: Die „Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen“ der FGSV [73] zeigen ein Verfahren auf, wie die bemessungsrelevante Beanspruchung unter Zuhilfenahme von straßenklassenspezifischen Lastkollektivquotienten oder anhand detaillierter Achslastdaten zu ermitteln ist. Nach Straßenart und Beanspruchung des zu betrachtenden Abschnitts ergeben sich unterschiedliche Bauklassen, denen schließlich ein einheitlicher Nutzungszeitraum von 30 Jahren zugeordnet wird. Die Zunahme des Verkehrs kann schließlich dazu führen, dass einerseits kürzere Inspektions- und Wartungsintervalle erforderlich werden, andererseits frühzeitig Unter- und/oder Oberbau den veränderten Verkehrsverhältnissen angepasst werden müssen. Implizit wird die zuvor zum Abnutzungsverhalten getroffene Aussage durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung bestätigt. Im Verkehrsinvestitionsbericht 2010 [48] wird aufgeführt, dass Untersuchungen bei Großbrücken, die zwischen 1960 und 1980 errichtet wurden, ergaben, dass bisher vorhandene Tragfähigkeitsreserven allmählich aufgebraucht sind und der weiter steigende Schwerverkehr nur noch eine begrenzte Zeit aufgenommen werden kann. Als Begründung werden neben der starken Zunahme des Güterverkehrs und der mehrfachen Anhebung der zulässigen Gesamtgewichte vor allem die exponentiell gestiegenen Genehmigungen von Schwerlasttransporten angeführt. Es wird die Schlussfolgerung gezogen, dass eine Ausweitung der Bauwerksbelastung durch Schwerverkehr u.a. zu einer vorzeitigen Materialermüdung und einer Verkürzung der Nutzungsdauer der Bauwerke führt.

Über die in Abbildung 1 aufgeführten Straßentunnel der Bundesfernstraßen hinaus befinden sich weitere Tunnel in der Baulast der Länder, Kreise oder Gemeinden. Diese Tunnel liegen auf Landes-, Kreis- oder Gemeindestraßen. Sie zeichnen sich zumeist durch Bauwerkslängen in der Größenordnung mehrerer 100 m aus. Häufig dienen sie der Ortsumgehung, der Kreuzung mit anderen Verkehrswegen oder der Verbesserung des Lärmschutzes. Je nach Lage des Tunnels kann die Verkehrsbelastung ebenfalls zunehmen; überwiegend nehmen diese Strecken jedoch den Charakter von Gemeindeverbindungen oder Flächenerschließungen ein. Sie dienen demnach vorwiegend dem regionalen Individual- und Gewerbeverkehr bzw. stellen eine Verbindung für den überregionalen Verkehr bis zum Anschluss an das Bundesfernstraßennetz her. Nach Auskunft durch Friebel [30] beläuft sich die Anzahl der außerhalb der Bundesfernstraßen zum Ende des Jahres 2010 betriebenen Tunnel auf etwa 130; die diesbezügliche Gesamtröhrenlänge beträgt knapp 90 km.

Zusammenfassend lässt sich das Fazit formulieren, dass die verkehrliche Bedeutung von Straßentunneln in den nächsten Jahren weiter zunehmen wird. Maßgeblich trägt dazu bei, dass der Neubau von Tunnelbauwerken insbesondere in dicht besiedelten und schutzwürdigen Gebieten weiterhin einen hohen Stellenwert einnehmen wird. Darüber hinaus sind bestehende Straßentunnel den veränderten Rahmenbedingungen durch die Intensivierung von Sanierungs- und Erhaltungsaufwendungen sowie durch sicherheitstechnische Nachrüstungen anzupassen.

2.2 Sicherheit

Nach Untersuchungen von Brilon und Lemke [15] ist die Unfallhäufigkeit auf Tunnelstrecken signifikant geringer als auf einem Abschnitt, der im Freien verläuft. Einerseits erzwingen Tunnel vom Verkehrsteilnehmer eine disziplinierte Fahrweise, andererseits erfahren Geschwindigkeitsbeschränkungen eine vergleichsweise gute Beachtung. In Gegenverkehrstunneln herrscht Überholverbot, in Richtungsverkehrstunneln finden aufgrund eines weitgehend homogenen Verkehrsflusses weniger Spurwechsel statt. Freibauer [76] ergänzt, dass viele für freie Strecken typische Unfälle im Tunnel nicht auftreten. Gründe dafür sind, dass Kreuzungen in Tunneln wegfallen und ungünstige Fahrbahn- und Sichtverhältnisse, verursacht durch Schnee, Glatteis, Regen oder Nebel nicht auftreten. Ebenfalls bleiben Wildquerungen im Gegensatz zur freien Strecke aus.

Brandereignisse in Tunneln haben in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre sowie im Jahr 2001 große Aufmerksamkeit erregt und dazu geführt, dass die Sicherheit von Straßentunneln einer grundlegenden Neubewertung unterzogen wurde. Aus der von Kordina [114] zusammengestellten Tabelle sollen zur Verdeutlichung der Ereignisausmaße einige verheerende Katastrophen in alpenländischen Gegenverkehrstunneln wiedergegeben werden:

- Am 10. April 1995 werden durch einen Brand infolge einer Massenkollision im österreichischen Pfänder-tunnel 3 Menschen getötet,
- Am 24. März 1999 gerät ein Lkw im Mont-Blanc-Tunnel zwischen Frankreich und Italien in Brand und fordert 41 Todesopfer,
- Am 29. Mai 1999 verursacht im österreichischen Tauern-tunnel der Auffahrunfall eines Lkws eine Massen-karambolage mit Brandfolge, wobei 12 Personen ihr Leben verlieren und 42 Personen verletzt werden,
- Am 24. Oktober 2001 stoßen im schweizerischen Gotthard-Straßentunnel zwei Lkws zusammen und fordern 10 Menschenleben.

Die Gründe, die zu einem Brand im Tunnel führen können, sind vielfältig: überhitzte Fahrzeugteile, leicht entzündliche Transportgüter, auslaufende Flüssigkeiten oder die Kollision von Fahrzeugen können neben weiteren denkbaren Szenarien Ursachen zur Entstehung eines Brandes sein. Der überwiegende Teil der Brandereignisse in Tunneln verläuft ohne größere Auswirkungen und wird rechtzeitig von den Rettungsdiensten oder von den Tunnelnutzern selbst gelöscht. Handelt es sich allerdings um ein nicht überschaubares Brandlastvolumen oder um leicht entzündliche Substanzen, so besteht die Gefahr einer raschen Ausbreitung oder die Entstehung weiterer Folgeereignisse. Kommt es zu einem unkontrollierbaren Ereignisverlauf, so herrschen in einer Tunnelröhre im Vergleich zu einer Straßenführung im Freien eklatant andere Randbedingungen:

- Bis die im Tunnel installierte Brandlüftung auslöst und sich ggf. eine stabile Entrauchungssituation etabliert hat, erfolgt eine unkontrollierte Ausbreitung lebensbedrohlicher Rauchgase,
- Für Personen im Tunnel nimmt die Orientierung aufgrund einer schlechten Sichtbarkeit schnell ab; das Auffinden eines sicheren Bereiches wird erheblich erschwert,
- Die Temperatur steigt schnell an und kann zum Überschlag eines Brandes auf andere Brandlasten führen.

Als Konsequenz der Häufung von Brandereignissen wurde im Jahr 2004 vom Europäischen Parlament die Richtlinie 2004/54/EG [66] zu „Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz“ eingeführt. Darin werden den Mitgliedsländern der Europäischen Union verbindliche Vorgaben zur Übernahme von Mindeststandards in nationale Regelwerke gemacht. In Deutschland wurden am 27. April 2006 die „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ [72] in einer grundlegend überarbeiteten Version erlassen. Die darin getroffenen Regelungen haben verbindliche Gültigkeit für alle

Tunnel der Bundesfernstraßen im transeuropäischen Streckennetz und gehen nach Expertenmeinung inhaltlich über die Forderungen der europäischen Tunnelrichtlinie hinaus.

Der zeitliche Rahmen zur Umsetzung der Modernisierungs- und Nachrüstungsmaßnahmen in Straßentunneln ist abhängig von der in einem europäischen Mitgliedsstaat herrschenden Tunneldichte. In Deutschland wird nach Aussage des BMVBS [48] angestrebt, das Nachrüstungsprogramm für Tunnel der Bundesfernstraßen – es umfasst sowohl bauliche als auch betriebstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit – im Jahr 2015 abzuschließen.

Sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene sind in den letzten Jahren mehrere Forschungs- und Entwicklungsprojekte durchgeführt worden, die sich schwerpunktmäßig mit der sicheren Planung und dem sicheren Betrieb von Straßentunneln auseinandersetzen. Innerhalb des fünften Forschungsrahmenprogramms der Europäischen Kommission sind dazu, wie Khoury [108] aufführt, zwischen 2001 und 2006 sieben Einzelprojekte mit unterschiedlichen Zielstellungen gefördert worden. Die drei Projekte FIT³, Virtual Fires und UPTUN⁴ haben sich aus unterschiedlichen Blickwinkeln mit Bränden in Tunneln befasst; im Rahmen der Projekte Safe Tunnel, SIRTAKI⁵ und SafeT⁶ wurden Management- und Präventionsmaßnahmen für einen sicheren Tunnelbetrieb erarbeitet und das Projekt DARTS⁷ hat sich mit Dauerhaftigkeits- und Zuverlässigkeitsaspekten bei der Planung von Tunnelbauwerken auseinandergesetzt.

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung veranlassten Programms „Forschung für die zivile Sicherheit“ wurden im Vorhaben SKRIBT⁸ zwischen 2008 und 2011 die für Tunnelbauwerke relevanten Gefährdungen im Hinblick auf aktuelle und künftige Bedrohungslagen festgestellt. Im Anschluss daran sind geeignete Schutzmaßnahmen zur Verringerung der Verletzbarkeit der Bauwerke sowie zum Schutz der Bauwerksnutzer erarbeitet worden. Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind danach zu unterscheiden, ob sie auf die Reduzierung des Ereignisausmaßes oder auf die Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses abzielen. Dem Baulastträger bzw. dem Betreiber eines Tunnelbauwerks wird die Möglichkeit gegeben, die Kritikalität eines Bauwerks im Hinblick auf verschiedene Bedrohungslagen zu ermitteln, geeignete Schutzmaßnahmen aus einem Katalog auszuwählen und abschließend eine erneute Kritikalitätsbewertung vorzunehmen. Mit der Weiterentwicklung der Wassernebeltechnologie zur Brandbekämpfung in Tunneln setzt sich das Forschungsprojekt SOLIT⁹ auseinander. Dabei bildet auf Grundlage von Messdaten, die während realitätsnaher Brandversuche in einer Tunnel-Versuchsanlage gewonnen wurden, ein computergestütztes Simulationsmodell die Interaktion zwischen dem Brandverhalten und der Wirksamkeit der Brandbekämpfung ab. Wirtschaftliche Überlegungen zum Einsatz von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln sind ebenfalls in das Forschungsvorhaben inkludiert.

Vor dem Hintergrund einer schnellen technischen Weiterentwicklung ist davon auszugehen, dass auch in Zukunft eine weitere Anhebung des Sicherheitsniveaus in Straßentunneln mit entsprechenden finanziellen Folgen für den Betreiber erfolgen wird. Der Schwerpunkt wird dabei auf der technischen Weiterentwicklung zum Ereignismanagement liegen; zu nennen sind hier die Detektion außergewöhnlicher Vorfälle als auch die szenarienabhängige Weitergabe sicherheitsrelevanter Informationen an die Tunnelnutzer.

³ FIT = Fire in Tunnels

⁴ UPTUN = Upgrading Tunnels

⁵ SIRTAKI = Safety Improvement in Road and Rail Tunnels using Advanced Information Technologies and Knowledge Intensive Decision Support Models

⁶ SafeT = Safety in Tunnels

⁷ DARTS = Durable and Reliable Tunnel Structures

⁸ SKRIBT = Schutz kritischer Tunnel und Brücken im Zuge von Straßen

⁹ SOLIT = Safety of Life in Tunnels

2.3 Entwicklung der Investitionen in Deutschland

2.3.1 Neubauten seit den 1970er Jahren

Durch die Bundesregierung werden seit Mitte der 1970er Jahre Berichte zu den Investitionen, die jährlich in die Straßeninfrastruktur fließen, herausgegeben. Bis zum Berichtsjahr 2006 wurden Aufwendungen für Neu-, Um- und Ausbaumaßnahmen im „Straßenbaubericht“ [47] veröffentlicht, seit dem Berichtsjahr 2007 werden die Ausgaben für Straßen, Schienen- und Wasserwege in einem „Verkehrsinvestitionsbericht“ [48] zusammengefasst. Investitionen für Ingenieurbauwerke, dies sind im Straßeninfrastrukturnetz hauptsächlich Brücken und Tunnel, werden in den Berichten nicht in einem gesonderten Abschnitt behandelt. Dennoch werden bedeutende Großprojekte, zu denen auch der überwiegende Teil der Tunnelbauwerke hinzugezählt wird, bezüglich ihrer Lage im Straßennetz, der Investitionshöhe und dem Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe aufgeführt. Publikationen der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [70] sowie die durch das Bundesverkehrsministerium herausgegebene Schriftenreihe „Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen“ [26] haben zusätzlich dazu beigetragen, die Investitionen für Tunnelbauwerke der letzten 40 Jahre nachvollziehbar zu machen.

In Abbildung 5 ist der prozentuale Anteil der Investitionen für Tunnelneubauten an den gesamten jährlichen Investitionen für Erneuerungs-, Um-, Aus- und Neubaumaßnahmen im Bundesfernstraßennetz zwischen 1975 und 2009 dargestellt. Zur Auswertung der Daten wurde das folgende Vorgehen gewählt:

- Für das Jahr der Inbetriebnahme eines Straßentunnels wurden die Kosten für Rohbau und Ausstattung ermittelt. Die Preise spiegeln den Zeitpunkt der Fertigstellung wider, eine Bereinigung etwaiger Inflationseffekte ist nicht erfolgt.
- Aus den Straßenbau- [47] bzw. Verkehrsinvestitionsberichten [48] wurden die Gesamtkosten, die innerhalb eines Jahres in den Ausbau der Bundesfernstraßen geflossen sind, ermittelt. Darin sind die Anteile für Erhaltungs-, Um-, Aus- und Neubaumaßnahmen sowie für Grunderwerb und für den Erwerb privatfinanzierter Bundesfernstraßenabschnitte enthalten. Es handelt sich hierbei ebenfalls um die Preise des jeweiligen Jahres.
- Zur Umrechnung der Geldbeträge von Deutscher Mark (DM) in Euro wurde der offizielle Wechselkurs (1 € = 1,95583 DM) genutzt.
- Konnten Baukosten für ein Tunnelprojekt nicht mehr eindeutig recherchiert werden, so sind mittlere Vergleichswerte herangezogen worden. Als Grundlage dieser Ermittlung wurden die Ergebnisse eines Forschungsprojektes der Bundesanstalt für Straßenwesen genutzt. Der zugehörige Abschlussbericht [18] führt Kosten für Rohbauarbeiten und für technische Ausstattungen in Abhängigkeit von Tunnelbauweise und -länge auf. Die angegebenen Kosten beziehen sich auf eine Preisbasis im Jahr 2004 und sind auf das Fertigstellungsjahr des betreffenden Tunnelbauwerks unter Zuhilfenahme eines Zinssatzes von 4 % (vgl. Vorgehen in Abschnitt 1.1) auf- bzw. abgezinst worden.

Nach Abschluss der zuvor schrittweise erläuterten Systematik wurden die Gesamtkosten für Neubau und Ausstattung aller in einem Jahr in Betrieb gegangenen Tunnel aufsummiert und den Gesamtinvestitionen in das Bundesfernstraßennetz gegenübergestellt. Das in Prozent ausgedrückte Verhältnis ist abschließend in Abbildung 5 dargestellt.

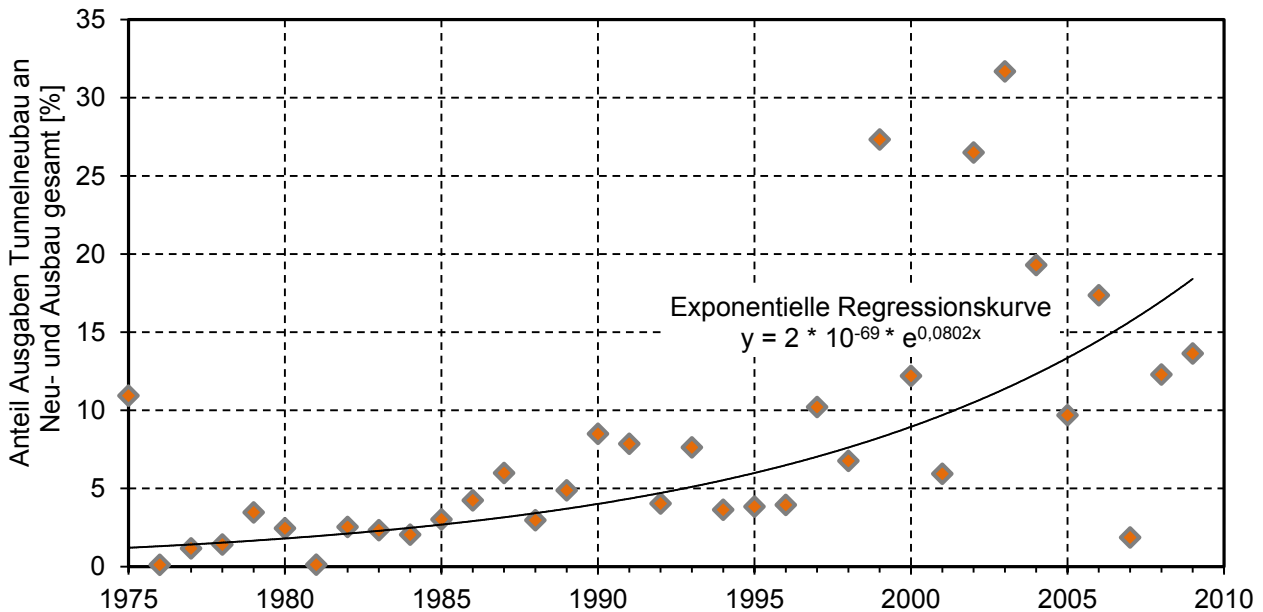


Abbildung 5: Anteil der Aufwendungen für Tunnelneubauten an den Gesamtinvestitionen in das Bundesfernstraßennetz, mit Daten aus [48], [47], [70], [26], [18]

Aus Abbildung 5 wird ersichtlich, dass die jährlichen Ausgaben für Tunnelneubauten im Bundesfernstraßennetz über einen Zeitraum von 1975 bis 2009 stark zugenommen haben. Neben dieser Grundtendenz, die auch durch die in die Abbildung eingetragene exponentielle Regressionskurve bestätigt wird, sind teils markante Kostensprünge zwischen den einzelnen Jahren festzustellen. Diese Schwankungen sind darauf zurückzuführen, dass sich die Bauphase für ein Tunnelprojekt üblicherweise über mehrere Jahre erstreckt, die Rohbau- und Ausstattungskosten jedoch nur als Gesamtsumme zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Bauleistung bilanziert werden. Eine derartige Erfassung führt beispielsweise im Jahr 1975 mit der Fertigstellung der ersten drei Röhren des Elbtunnels in Hamburg oder infolge des Abschlusses der Bauarbeiten für den Engelberg-Basistunnel in Leonberg (Baden-Württemberg), für den Saukopftunnel an der Landesgrenze zwischen Hessen und Baden-Württemberg und für den Tunnel Königshainer Berge in Sachsen im Jahr 1999 zu signifikanten Ausschlägen, da diese Bauwerke sehr hohe Investitionssummen aufwiesen. Dass die Investitionen in Tunnelneubauten in Bezug auf die jährlichen Gesamtausgaben für den Straßenbau gestiegen sind, kann ebenfalls aus der dargestellten Entwicklung geschlossen werden. Bliebe der dargestellte Anteil über die Zeit weitgehend konstant, so würde dies implizieren, dass die Zunahme der Ausgaben entweder der Preissteigerung entspräche oder aber die gesamten Investitionen in die Straßeninfrastruktur in gleichem Maße wie die Investitionen in Tunnelbauwerke stiegen. Somit ist zusammenfassend bestätigt, dass die Ausgaben für Tunnelneubauten nicht nur absolut steigen, sondern auch einen zunehmend höheren Stellenwert in Bezug auf die Gesamtinvestitionen in das annähernd gleich lang gebliebene Bundesfernstraßennetz einnehmen.

Wie die Auswertung der Investitionskosten für fertiggestellte Tunnelbauwerke (vgl. Tabelle 1 in Abschnitt 1.1) ergeben hat, variieren die Aufwendungen pro Tunnelmeter deutlich. Gründe für diese Beobachtungen liegen darin, dass die projektspezifischen Rahmenbedingungen großen Einfluss auf die Baukosten ausüben. Beispielsweise bestimmen die Größe des Tunnelquerschnitts, die Tiefenlage des Tunnels sowie die geologischen und hydrogeologischen Eigenschaften des Baugrundes die Wahl eines geeigneten Bauverfahrens, den Umgang mit Grundwasser und die statische Dimensionierung der Tunnelauskleidung. Darüber hinaus können die Bedingungen an der Geländeoberfläche zwischen sensibler innerstädtischer Bebauung und

unbebautem Naturraum variieren. Aus diesen Gegebenheiten resultieren ebenfalls Rückschlüsse auf geeignete Bauverfahren bzw. die Notwendigkeit weiterer baubegleitender Maßnahmen.

Die Überarbeitung normativer Vorgaben – insbesondere betrifft dies die erforderlichen sicherheitstechnischen Ausstattungen in Straßentunneln – hat dazu geführt, dass die Errichtung von Straßentunneln insgesamt teurer geworden ist. Darüber hinaus ist eine zunehmende Verknüpfung aller Betriebskomponenten zu beobachten. Um dies zu bewerkstelligen sind leistungsfähige Rechner vorzuhalten.

2.3.2 Bewirtschaftung von Straßentunneln

Für Straßentunnel sind gemäß Forderungen der DIN 1076 [52] bzw. der ZTV-ING [19] vom Betreiber vor der Inbetriebnahme Betriebs- und Wartungskonzepte aufzustellen und während des Betriebs kontinuierlich an die aktuellen Erfordernisse anzupassen. Das Betriebskonzept beinhaltet, wie Petschacher [134] ausführt, konkrete Vorgaben, die während des täglichen Tunnelbetriebs zu beachten sind. Maßnahmen für Inspektionen und Instandhaltungen des Tunnelbauwerks beinhaltet hingegen das Wartungskonzept. Faktoren, die bei Aufstellung eines Wartungskonzeptes und bei der Planung von Instandhaltungsmaßnahmen zu beachten sind, gehen beispielsweise aus Veröffentlichungen der FGSV [71] oder des PIARC-Komitees C3.3 [136] hervor. Bei Thewes und Vogt [158] ist für eine Tunneldrainage exemplarisch beschrieben worden, wie ein Wartungskonzept zu erstellen und geeignete Wartungsintervalle zu bestimmen sind. In Abhängigkeit von den Ergebnissen einer Bauwerksinspektion ist in einem dynamischen Prozess festzulegen, zu welchem Zeitpunkt Instandhaltungen oder ggf. auch Sanierungen erforderlich werden. Bei der Bewirtschaftung von Straßentunneln kann demzufolge grundsätzlich zwischen Kosten für Unterhaltung und Betrieb sowie für Maßnahmen der Instandhaltung unterschieden werden:

- Betriebs- und Unterhaltungskosten fallen fortlaufend während des Regelbetriebs an; sie weisen pro Zeiteinheit – beispielsweise auf jährlicher Basis – für ein bestimmtes Tunnelbauwerk eine wiederkehrend ähnliche Größenordnung auf,
- Instandhaltungskosten inkludieren Aufwendungen für größere Instandhaltungsmaßnahmen und Sanierungen eines Straßentunnels; in Zeitintervallen von Jahrzehnten sind hierfür entsprechende Kosten vorzusehen.

Zunächst soll der Kostenanteil, der für den Regelbetrieb eines Tunnelbauwerks aufzuwenden ist, näher betrachtet werden. Im täglichen Betrieb fallen hauptsächlich Kosten für die Ver- und Entsorgung, für das Betriebs- und Wartungspersonal sowie für die Vorhaltung der erforderlichen Betriebseinrichtungen an. Der überwiegende Anteil der Betriebskosten entfällt auf die Energiekosten, ein weiterer Anteil auf die Personalkosten für die Betriebsüberwachung. Elektrische Energie wird für die Ausleuchtung des Tunnels, die Zuführung von Frischluft, den Betrieb von Verkehrsleiteinrichtungen und Pumpwerken sowie für die computergestützte Steuerung und Überwachung des Tunnelbauwerks benötigt. Personalintensive Arbeiten für Reinigungs- und Wartungsarbeiten sind Bestandteil der Unterhaltungskosten. Durch die FGSV [70] wird eine grafische Darstellung zur Verfügung gestellt, die die Summe der jährlichen Kosten für Betrieb und Unterhaltung in Abhängigkeit von der Tunnellänge und der Betriebsweise des Tunnels ausdrückt. Für einzelne Tunnellängen werden die aus der Darstellung abgeleiteten Bandbreiten der Kosten in Tabelle 3 dargestellt.

Tunnellänge [m]	Bandbreite der jährlichen Kosten [€/a]	
	Gegenverkehrstunnel	Richtungsverkehrstunnel
200	10.000 bis 45.000	20.000 bis 130.000
400	20.000 bis 70.000	40.000 bis 150.000
1000	76.000 bis 135.000	155.000 bis 350.000

Tabelle 3: Jährliche Kosten für Betrieb und Unterhaltung von Straßentunneln, nach [70]

Es wird ersichtlich, dass die Betriebs- und Unterhaltungskosten nach Auswertung von insgesamt 170 in Betrieb befindlichen Straßentunneln eine sehr große Streuung aufweisen. Dies hängt damit zusammen, dass jedes Tunnelbauwerk an die verkehrs- und umfeldspezifischen Rahmenbedingungen angepasst ist und beispielsweise für Tunnel identischer Länge unterschiedliche Lüftungskonzepte zur Ausführung kommen können. Auch hängt, wie schon zuvor verdeutlicht, der Umfang der erforderlichen Ausstattung mit der im Tunnel zu erwartenden Verkehrsbelastung zusammen. Nach [70] ist eine Tendenz erkennbar, dass durch den vermehrten Einsatz der Gegenstrahlbeleuchtung sowie durch eine Verringerung der Emissionen infolge der technischen Weiterentwicklung von Fahrzeugantrieben eine Einsparung der Betriebskosten erfolgt. Generell werden alle Anlagenteile, die eine hohe energetische Leistungsaufnahme erfordern, in Bezug auf ihre Energieeffizienz in den nächsten Jahren eine voranschreitende technische Weiterentwicklung erfahren. In Abschnitt 2.5 werden Ansätze zu wirtschaftlichen Handlungsweisen, wie sie aus derzeitig gültigen Regelwerken hervorgehen, aufgeführt und näher erläutert.

Für das gesamte Bundesfernstraßennetz ist nach Auswertung der Straßenbau- bzw. Verkehrsinvestitionsberichte der Bundesregierung [48], [47] in Abbildung 6 die zeitliche Entwicklung der Investitionen in das Bundesfernstraßennetz zwischen 1975 und 2005 dargestellt. In der Abbildung wird nach jährlichen Investitionssummen für Neu- und Ausbau einerseits und für Betrieb und Unterhaltung andererseits differenziert. Die dargestellten Summen spiegeln die jeweiligen Preise in Euro wider. Zusätzlich ist auf der rechten Ordinate der Anteil der Betriebs- und Unterhaltungskosten an den Investitionen auf einer jährlichen Basis aufgetragen.

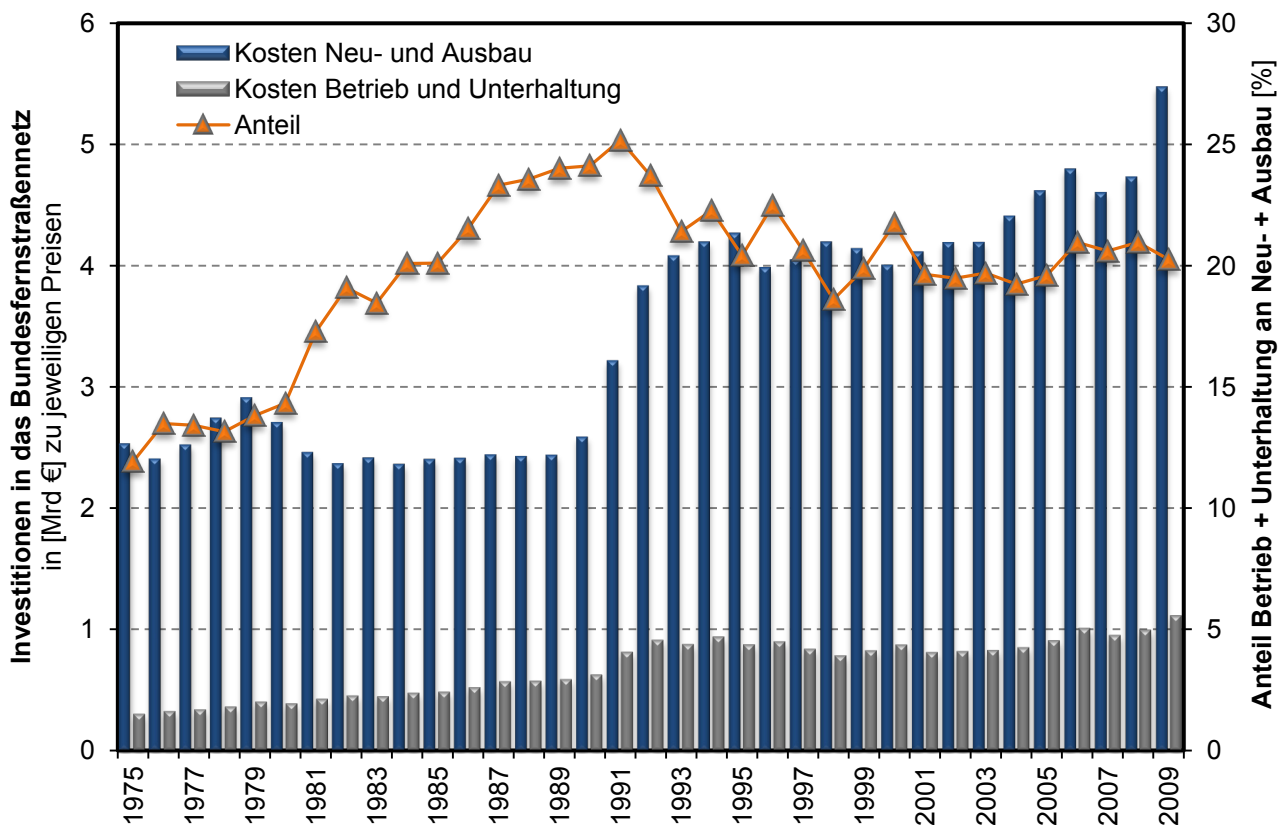


Abbildung 6: Kostenentwicklung für Neu- und Ausbau sowie für Betrieb und Unterhaltung des Bundesfernstraßennetzes zwischen 1975 und 2009, mit Daten aus [48] und [47]

Während der Anteil der Betriebs- und Unterhaltungskosten in Bezug auf die Investitionen in Neu- und Ausbau der Bundesfernstraßen bis zum Jahr 1991 auf über 25 % steigen, so ist danach ein Absinken auf etwa 20 % zu beobachten. Als Folge der deutschen Wiedervereinigung im Jahr 1990 nimmt damit das Investi-

onsvolumen in den Neu- und Ausbau deutlich zu, Betriebs- und Unterhaltungskosten steigen jedoch nicht im selben Umfang. Offensichtlich bewirken höhere Investitionen in den Netzausbau eine Vernachlässigung der Unterhaltungskosten. Diese Strategie hat, wie auch später in diesem Abschnitt noch gezeigt wird, negative Auswirkungen auf die Qualität des Bundesfernstraßennetzes.

Der Betrieb eines Bauwerks führt infolge des bestimmungsgemäßen Gebrauchs bei Baustoffen und Bauteilen zu Verschleißerscheinungen. Im Sinne der DIN 31051 [55] wird Verschleiß auch als der „Abbau des Abnutzungsvorrates“ bezeichnet und macht es in regelmäßigen Abständen erforderlich, Bauwerksprüfungen durchzuführen. Mit dem Einbau eines neuen Bauteils beträgt der anfängliche Abnutzungsvorrat 100 %, mit voranschreitender Nutzung verringert sich dieser, bis schließlich eine komponentenspezifische Abnutzungsgrenze erreicht wird und wegen des drohenden Bauteilausfalls ein Austausch unabwendbar ist. Im Rahmen einer Bauwerksprüfung werden sowohl die Baustoffe, die die Struktur des Bauwerks bilden, als auch die installierten betriebstechnischen Komponenten in vorgegebenem Umfang kontrolliert. Anhand der protokollierten Begutachtungsergebnisse sind, soweit erforderlich, Baustoffe und Betriebskomponenten instandzusetzen oder auszutauschen. Werden die während einer Bauwerksprüfung festgestellten Unzulänglichkeiten nicht abgestellt oder durch den Betreiber ignoriert, kann dies dazu führen, dass der Wertverlust einer Anlage übermäßig schnell voranschreitet und aus ursprünglich kleinen Instandhaltungsmaßnahmen zu einem späteren Zeitpunkt umfangreiche Sanierungsaufwendungen resultieren. Die Kosten, die für Erneuerungen und Komponentenaustausch aufgewendet werden, sind die zuvor eingeführten Instandhaltungskosten.

Für den gesamten Straßenbestand in Deutschland ist durch das BMVBS in [31] eine Zeitreihe veröffentlicht worden, die die Entwicklung des qualitativen Zustandes des Straßennetzes aufzeigt. Neben den Straßenverkehrsflächen werden alle zusätzlichen baulichen Anlagen wie Brücken, Tunnel, Durchlässe, Dämme und sonstige Kunstbauwerke erfasst. Als Beurteilungsgröße dient das Brutto-Anlagevermögen. Es quantifiziert den Wiederbeschaffungswert, indem die in der Vergangenheit erfolgten Investitionen in die Straßeninfrastruktur anhand von Preisindizes auf den Bewertungszeitpunkt bereinigt und anschließend aufsummiert werden. Überschreitet die tatsächliche Gesamtbetriebszeit einer Verkehrsanlage die in Abschreibungstabellen aufgeführten Nutzungsdauern, so fällt sie aus der Gesamtheit der zu bewertenden Verkehrsanlagen heraus. Eine weitere Beurteilungsgröße, das Netto-Anlagevermögen, spiegelt den Zeitwert der zu unterschiedlichen Zeitpunkten installierten Verkehrsanlagen wider. Dieser Wert wird unter Abzug der linear über die Nutzungszeit berechneten Abschreibungen ermittelt. Um eine Vergleichbarkeit beider Größen sicherzustellen, ist das Netto-Anlagevermögen auf dieselbe Preisbasis zu beziehen, für die auch das Brutto-Anlagevermögen ermittelt wurde. Der Quotient aus Netto- und Brutto-Anlagevermögen wird als Modernitätsgrad definiert und stellt nach [31] eine mittelbare Messgröße für den Altersaufbau des Anlagevermögens deutscher Straßeninfrastruktur dar. Der Modernitätsgrad drückt somit in Prozent aus, welcher Anteil des gesamten Anlagevermögens noch nicht abgeschrieben ist. In Abbildung 7 sind Brutto- und Netto-Anlagevermögen sowie die Entwicklung des Modernitätsgrades zwischen 1991 und 2008 aufgetragen. Die Preisbasis, die der Abbildung zugrunde liegt, bezieht sich auf das Jahr 2000.

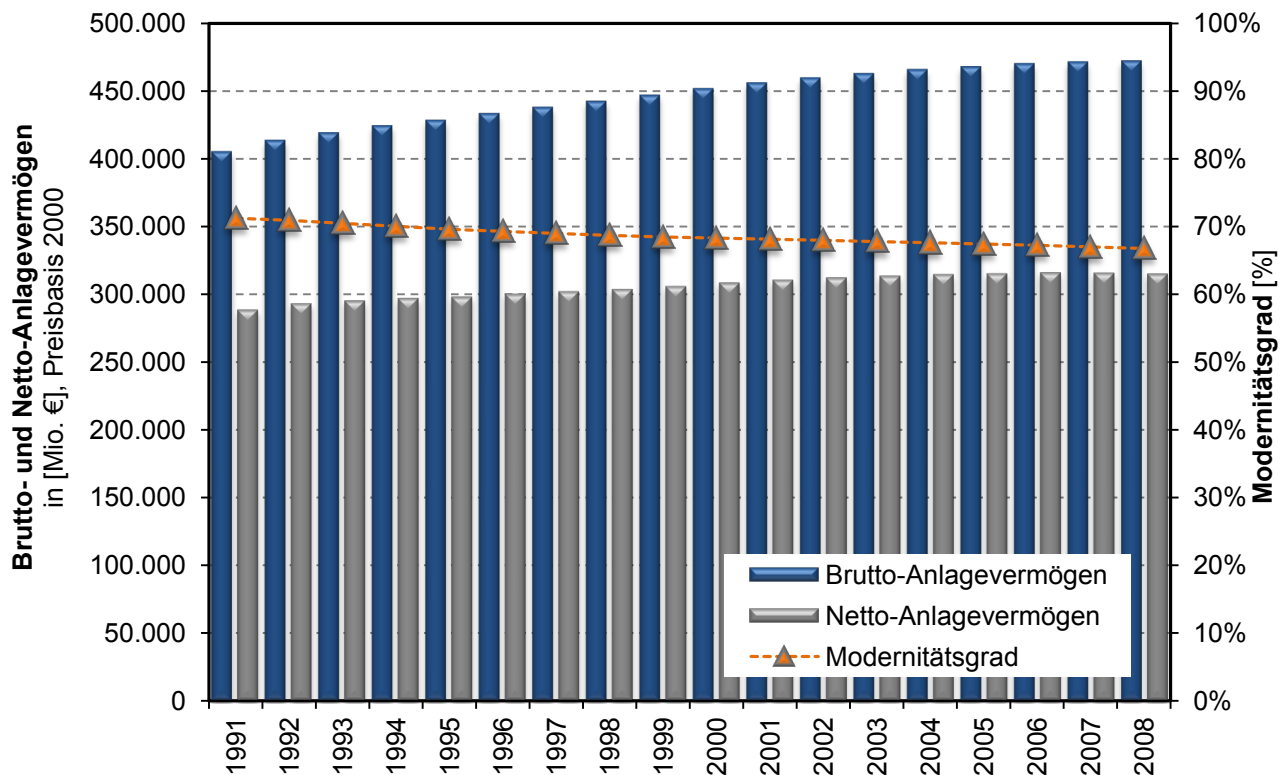


Abbildung 7: Entwicklung des Brutto- und des Netto-Anlagevermögens sowie des Modernitätsgrades der deutschen Straßeninfrastruktur zwischen 1991 und 2008, nach [31]

Abbildung 7 weist einen kontinuierlich fallenden Modernitätsgrad auf. Der Anstieg des Brutto-Anlagevermögens deutet zwar einerseits darauf hin, dass die Investitionen in das Straßennetz größer sind als der Wegfall von Verkehrsanlagen, die die Nutzungsdauer bereits erreicht haben, andererseits führen erhebliche Abschreibungen dazu, dass das Netto-Anlagevermögen nur vergleichsweise gering steigt. Das Verhältnis von Neuinvestitionen zur Höhe der Abschreibungen hat sich also fortlaufend verringert. Diese Beobachtung steht auch im Einklang mit der aus Abbildung 6 abgeleiteten Aussage, wonach eine Vernachlässigung der Unterhaltungskosten seit Anfang der 1990er Jahre zu beobachten ist.

Die für das Straßennetz gezeigte Entwicklung ist auch auf den baulichen Zustand der Straßentunnel übertragbar. Da, wie Abbildung 8 zeigt, die Tunnel der Bundesfernstraßen im Verhältnis zu ihrer zu erwartenden Nutzungsdauer von 80 bis 130 Jahren (nach BMVBS [32]) eine geringe Altersstruktur aufweisen, kann gefolgert werden, dass

- bisher kein Straßentunnelbauwerk aus dem Brutto-Anlagenvermögen herausgefallen ist,
- zwar gemäß [32] nach etwa 20 Jahren die Betriebstechnik eines Straßentunnels auszuwechseln ist, größere Sanierungen und Instandhaltungen der Bauwerksstruktur jedoch in den meisten Fällen bisher nicht erforderlich wurden,
- entgegen der Annahme einer linearen Abschreibung des Anlagevermögens die Aufwendungen für Sanierungen und Instandhaltungen infolge des Abbaus des Abnutzungsvorrates nicht-linear ansteigen; vielmehr ist davon auszugehen, dass Instandhaltungen anfänglich nur in sehr geringem Umfang erforderlich sind und diese mit steigendem Alter des Bauwerks zunehmen.

Der vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung herausgegebenen „Ablösebeträge Berechnungsverordnung“ [32] können einige theoretische Nutzungsdauern für die Tragwerksstruktur sowie für Tunnelausstattungs-elemente entnommen werden. Diese Angaben sind in Abbildung 8 integriert worden und

verdeutlichen den sich abzeichnenden Bedarf, betriebs- und verkehrstechnische Ausstattungen in den nächsten Jahren in deutschen Straßentunneln auszutauschen.

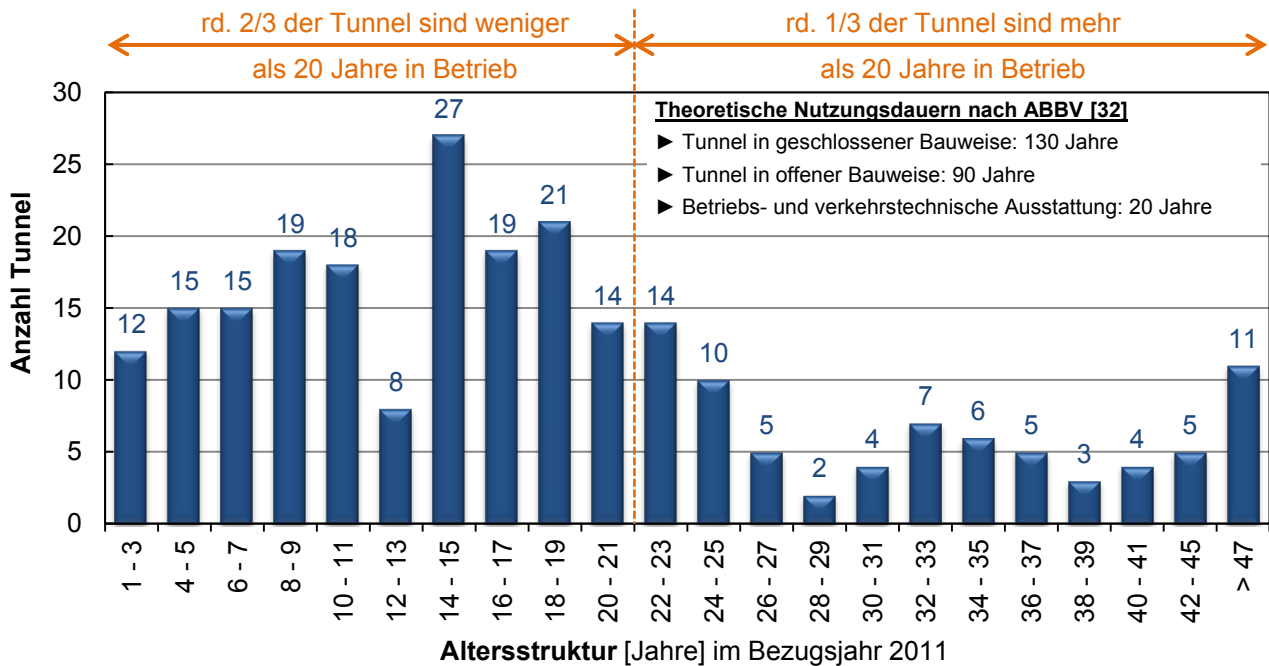


Abbildung 8: Altersstruktur der Tunnel der Bundesfernstraßen und theoretische Nutzungsdauern, mit Daten aus [113] und [32]

Derzeit werden Straßentunnel baulich und betrieblich nachgerüstet, um bestehende Tunnel der Bundesfernstraßen an die aktuellen Regelungen zur Erhöhung der Sicherheit (vgl. Abschnitt 2.2) anzupassen. Nach Angaben von Colditz [40] umfasst das Nachrüstungsprogramm mit Stand im Herbst 2011 einen Gesamtumfang von etwa 960 Mio € und soll nach einer Laufzeit von etwa 12 Jahren voraussichtlich im Jahr 2015 abgeschlossen werden. In die zuvor dargelegte Kostensystematik für Betrieb, Unterhaltung und Instandhaltung lassen sich diese Aufwendungen jedoch nicht einordnen. Vielmehr sind sie auf lange Sicht nicht planbar und gehen aus aktuellen verkehrlichen und sicherheitsrelevanten Betrachtungen hervor. Kosten, die durch derartige Anpassungen entstehen, sind als Sonderkosten einzustufen. Zu dieser Kategorie sind darüber hinaus Kosten hinzuzuzählen, die aufgewendet werden müssen, um den Tunnel nach einem Unfall oder einer sonstigen zerstörerisch wirkenden Handlung (Terror, Umweltkatastrophe) in den ursprünglichen Zustand zurückzusetzen, sofern der Tunnelbetreiber einen Teil dieser Kosten nicht über eine Versicherung geltend machen kann.

2.3.3 Zukünftige Herausforderungen hinsichtlich Neubau und Erneuerung von Straßentunneln

Das gesamte Straßennetz unterliegt stetigen Veränderungsprozessen. Die Anpassung an bereits existierende bzw. zukünftige Verkehrsbelastungen oder die Vermeidung negativer Auswirkungen auf das Umfeld machen Neu- und Ausbaumaßnahmen im bestehenden Straßennetz erforderlich. Beim Netzausbau stellen Tunnel häufig eine leistungsfähige Alternative zu einer in freier Strecke und ggf. über eine längere Distanz geführte Straßenkorridore dar. Die Aufrechterhaltung der Leistungsfähigkeit der Verkehrswege wird hingegen hauptsächlich von der Planung und der Durchführung von Erhaltungsmaßnahmen geprägt. Erhaltung ist erforderlich, um die Sicherheit und die Leistungsfähigkeit eines Tunnelbauwerks nachhaltig zu gewährleisten. Mit der Vernachlässigung oder Verschiebung von notwendigen Instandhaltungsmaßnahmen sind für den Baulastträger erhebliche finanzielle Konsequenzen verbunden.

Der Bedarf an unterirdischen Straßenverkehrsbauwerken zur Auflösung von Engpässen wird auch in den nächsten Jahren ein hohes Niveau aufweisen. Dennoch werden die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel nicht ausreichen, sämtliche Bauvorhaben zu realisieren. Um den Bedarf an Infrastrukturbauwerken auf Bundesfernstraßen vorausschauend abzuschätzen und zu klassifizieren, werden vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung regelmäßig Bundesverkehrswegepläne (BVWP) erarbeitet. Der aktuell gültige BVWP [27] wurde im Juli 2003 vorgelegt und besitzt einen Planungshorizont, der sich vom Jahr 2001 bis zum Jahr 2015 erstreckt. Die in den BVWP aufgenommenen Projekte werden in Abhängigkeit ihres Kosten-Nutzen-Verhältnisses, vom Stellwert im Verkehrsnetz sowie vom aktuellen Planungsstand und dem verfügbaren Investitionsrahmen priorisiert. Auch umwelt- und naturschutzfachliche Überlegungen sowie die Bewertung ökologischer Risiken fließen in die Gesamtbewertung mit ein. Lässt sich aus den vorgenannten Untersuchungen die Aufnahme eines Projektes in den BVWP begründen, so wird nach „vordringlichem Bedarf“ und „weiterem Bedarf“ unterschieden. Vordringlicher Bedarf liegt bei laufenden, fest disponierten oder bei bedeutenden neuen Projekten vor. Weiterer Bedarf ist angezeigt, wenn Planungsrecht bereits geschaffen wurde oder neue Vorhaben nicht dem vordringlichen Bedarf zugeordnet werden können.

Da sich aus dem Bundesverkehrswegeplan nicht unmittelbar das Volumen der geplanten Tunnelbauwerke der Bundesfernstraßen ableiten lässt, hat eine Anfrage beim Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [30] ergeben, dass sich derzeit 18 Tunnel in der Baulast des Bundes im Bau befinden und weitere 57 Tunnelbauwerke das Planfeststellungsverfahren durchlaufen oder bereits in der Bauvorbereitung sind. Eine Kategorisierung nach vordringlichem bzw. weiterem Bedarf für die letztgenannten 57 Bauwerke ist, so die Aussage des BMVBS weiter, nicht möglich.

Eine weitere Konkretisierung geht aus der Statistik hervor, die durch die „Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e.V.“ (STUVA) gepflegt und in regelmäßigen Abständen fortgeschrieben wird. Die letzte vorliegende Untersuchung weist die in Deutschland zum Jahreswechsel 2010/2011 in der Ausführung befindlichen und die ab dem Jahr 2011 geplanten Tunnelbauvorhaben aus. Die Ergebnisse der Untersuchungen durch Haack und Schäfer [90], [91] sind in Tabelle 4 dargestellt.

Straßen- kategorie	Zum Jahreswechsel 2010/2011 in Bau		Geplant ab Jahr 2011	
	Anzahl	Kilometer	Anzahl	Kilometer
Bundesautobahn	10	11,20	38	39,61
Bundesstraße	13	13,42	60	40,33
Sonstige	7*)	9,60	27	18,01

*) enthält auch die Errichtung von Fluchtstollen bei bestehenden Tunneln

Tabelle 4: In Bau befindliche und geplante Straßentunnel, nach [90], [91]

Wie in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 anhand von Daten aus der Vergangenheit dargelegt wurde, führt die Vernachlässigung der Unterhaltung von Bauwerken dazu, dass erforderliche Instandhaltungen auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden. Der zeitliche Verzug hat zur Folge, dass der Umfang von Korrekturmaßnahmen unter dem Einfluss der weiteren Bauwerksnutzung zunimmt und die Kosten für eine spätere Schadensbeseitigung überproportional steigen. Aktuelle Studien setzen sich mit der Vernachlässigung von Investitionen im Infrastrukturbereich auseinander und nehmen eine Quantifizierung des aus diesem Verhalten resultierenden Investitionsstaus vor. Die Kernaussagen zweier Studien werden im Folgenden kurz zusammengefasst.

Die Studie „KfW Kommunalpanel 2010“ [103] sieht einen Investitionsrückstand, wenn Qualität und Quantität der vorhandenen Infrastruktur nicht den gängigen Normen oder dem aktuellen Bedarf entsprechen und Anpassungsinvestitionen schon vor dem Betrachtungszeitpunkt hätten erfolgen müssen. Nach Befragungen sehen 20 % in ihrer Stadt oder Gemeinde einen gravierenden Investitionsstau und 51 % einen nennenswerten Rückstand bei der Straßen- und Verkehrsinfrastruktur. Dieser Bereich weist damit insgesamt den größ-

ten Investitionsrückstand auf, es folgen die Bereiche Kinderbetreuung, Schulen, Wasserversorgung und -entsorgung sowie der Zustand von Verwaltungsgebäuden.

Nach Einschätzung des Deutschen Instituts für Urbanistik liegt der im Rahmen der Studie „Der kommunale Investitionsbedarf 2006 bis 2020“ [49] ermittelte Bedarf im Straßenbausektor bei insgesamt 162 Mrd Euro (Preisbasis 2000). Der Schwerpunkt des Investitionsbedarfs im Straßenbau liegt mit 71 Mrd Euro beim Ersatzbedarf für vorhandene Straßen, Brücken und Tunnelanlagen.

Im Jahr 1996 wurde der Bundesregierung durch das Bundesministerium für Verkehr der zweite Bericht über Schäden an Bauwerken der Bundesverkehrswege zugeleitet [37]. Darin wird aufgeführt: „Der steigende Erhaltungsbedarf schmälert bei vorgegebenem Finanzvolumen zunehmend den Spielraum für Erweiterungsinvestitionen. [...] Die Vernachlässigung der Erhaltung der Bundesverkehrswege kann zu schweren Störungen im Verkehrsablauf, Beeinträchtigungen der Wirtschaft, zu Nachteilen für den Wirtschaftsstandort Deutschland und zu erheblichen finanziellen Belastungen des Bundes führen. Diese Aufgabe wird durch die Entwicklung des Verkehrs, des Alters des Anlagenbestandes und der Umweltbelastung künftig immer mehr an Bedeutung gewinnen.“ Im Verkehrsinvestitionsbericht für das Jahr 2010 [48] wird angeführt, dass eine ausreichende Qualität der Bundesfernstraßen nur mit einer verstärkt substanzorientierten Erhaltung gesichert werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, ist eine technisch, wirtschaftlich und baubetrieblich optimierte Erhaltungsplanung erforderlich. Es wird empfohlen, eine weitere Zustandsverschlechterung zu vermeiden und in den nächsten Jahren erhebliche Finanzmittel in die Erhaltung der Bauwerke zu investieren. Gemeinsam mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und den Straßenbauverwaltungen der Länder hat das BMVBS ein Bauwerk-Management-System (BMS) eingeführt. Ziel des modular konzipierten Systems ist nach [48] die Ermöglichung einer „nachvollziehbaren, objektiven und optimierten Erhaltungsplanung für einen bedarfsge rechten Einsatz der zur Verfügung stehenden Erhaltungsmittel.“ Nähere Ausführungen zum BMS können einer Veröffentlichung von Haardt et al. [93] entnommen werden.

2.4 Beschreibung des heutigen Vorgehens bei der Investitionsplanung

Nach Artikel 90, Absatz 1 des Grundgesetzes (GG) [23] ist der Bund der Eigentümer der Bundesfernstraßen. Die Länder oder die nach Landesrecht zuständigen Selbstverwaltungskörperschaften, so Absatz 2 weiter, „verwalten die Bundesautobahnen und sonstigen Bundesstraßen des Fernverkehrs im Auftrage des Bundes“.

Wie beispielsweise von Schröter [146] beschrieben, erfolgt die Finanzierung der Bundesfernstraßen aus Steuermitteln. Jedes Bundesland bzw. jede Selbstverwaltungskörperschaft erhält danach jährlich im Sinne des als Auftragsverwaltung bezeichneten Vorgehens festgelegte Geldmittel aus dem Bundeshaushalt. Die finanziellen Mittel werden nach Neubauinvestitionen, Erhaltungsbedarf und Betriebsaufwendungen unterteilt. Nach § 7 des Fernstraßenausbaugesetzes (FStrAbG) [21] berichtet der Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung dem Deutschen Bundestag jährlich über den Fortgang des Bundesfernstraßenbaus nach dem Stand vom 31. Dezember des Vorjahres. Für das Jahr 2006 wurden diese Berichte letztmals getrennt als „Bericht zum Ausbau der Schienenwege“ bzw. als „Straßenbaubericht“ [47] veröffentlicht. Seit dem Berichtsjahr 2007 werden die Ausführungen für Schienen-, Straßen- und Wasserwege in einem „Verkehrsinvestitionsbericht“ [48] zusammengefasst.

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargelegt wurde, ist es in den letzten Jahren bei der Finanzierung der Straßeninfrastruktur zu Investitionsrückständen gekommen, d.h. zwischen erforderlichem und tatsächlichem Bedarf hat sich eine immer weiter aufgehende Kluft entwickelt. Gründe dafür sind, dass sowohl das jährliche Volumen des Bundeshaushalts als auch der Anteil, der dem Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zur Verfügung gestellt wird, Schwankungen aufweisen. Zudem ist die Etathöhe von den herrschenden ökonomischen Rahmenbedingungen, wie Einnahmen aus Steuern, Verwaltung und Betrieb abhängig (z.B.

die entfernungsbezogene Lkw-Maut). Auch können politische Richtungsentscheidungen, die durch Regierungswechsel, konjunkturbeeinflussende Maßnahmen oder durch die Kürzungen von Ausgaben ausgelöst werden, weitreichende Konsequenzen auf die finanziellen Handlungsspielräume haben.

Die Aufstellung des Bundeshaushalts basiert auf der so genannten modernen Kameralistik, bei der lediglich Einnahmen und Ausgaben im Sinne von geplanten Soll-Daten betrachtet werden. Im Gegensatz zur Anwendung der Kameralistik auf Bundesebene wenden die Länder und Kommunen die „Doppelte Buchführung in Konten“ (Doppik) an. Beim doppischen System werden im Gegensatz zum kameralistischen System auch Aufwendungen und Erträge, also Faktoren, die das staatliche Gesamtvermögen betreffen, betrachtet. Nach Lüder [122] wird die Einführung der Doppik auf Bundesebene auch heute noch kritisch gesehen, da der Sinn einer Ergebnis- oder Erfolgsrechnung für Gebietskörperschaften wenig angebracht erscheint und da keine Gewinnerzielungsschabsichten vorliegen. Marett et al. [123] führen im Gegensatz dazu aus, dass die Kameralistik „nach herrschender Meinung durchaus zur viel beklagten Ineffizienz der Finanzsteuerung im öffentlichen Sektor“ beiträgt. Als zusätzliche Faktoren werden die „häufig fehlende Konkurrenz, das starre öffentliche Dienstrecht sowie die spezifischen Eigenarten der politisch gesteuerten, bürokratischen Administration“ aufgeführt.

Zusammenfassend hat die Gesamtheit der zuvor beschriebenen Einflüsse dazu geführt, dass einem definierbaren Bedarf an Finanzmitteln zur Instandhaltung nur begrenzte Budgets gegenüberstehen und somit auf Expertenbasis zu entscheiden ist, welche Bauwerke den vordringlichsten Erhaltungsbedarf aufweisen. Mit Vorlage der Investitionsrahmenplanung 2011-2015 [29] leitet das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung einen Philosophiewechsel ein. Es wird festgestellt, dass „um den Zustand auf dem derzeitigen, bereits abgesunkenen Niveau halten zu können, zukünftig mehr als bisher in die Erhaltung investiert werden muss“. Für den Zeitraum 2011-2015 wird das Volumen für Erhaltungsmaßnahmen im Bundesfernstraßennetz auf rund 12,4 Mrd € prognostiziert. Im selben Zeitraum werden die Investitionen in Aus- und Neubauprojekte auf 10,5 bis 13,5 Mrd € geschätzt. Um dem gestiegenen Bedarf für Erhaltungsmaßnahmen Rechnung zu tragen, sollen Aus- und Neubauprojekte, die sich in einem frühen Planungsstadium befinden, zu einem späteren Zeitpunkt begonnen werden.

Die öffentliche Hand hat in den letzten Jahren als Alternative zu herkömmlichen Projektabwicklungsformen auch im Straßeninfrastrukturbau sogenannte Öffentlich Private Partnerschaften (ÖPP) – international auch als Public Private Partnership (PPP) bezeichnet – geschlossen. Öffentlich Private Partnerschaften bezeichnen nach Girmscheid und Dreyer [81] eine vertraglich fixierte, langfristige, partnerschaftliche Kooperation zwischen öffentlicher Hand und Privatwirtschaft, deren partnerschaftlicher Aspekt dadurch begründet wird, dass die sich ergänzenden, operationalen Ziele beider Partner durch einen Zusammenschluss erreicht werden. Dabei wird das Oberziel der Effizienzsteigerung verfolgt, d.h. es wird eine Zuordnung der Ressourcen und Risiken innerhalb der Projektbeteiligten vorgenommen. Die öffentliche Hand behält innerhalb der Partnerschaft die Hoheitsfunktion, wobei je nach Aufgabenstellung Steuerungsfunktion, Leistungsumfang und Projektfinanzierung individuell zwischen den Partnern aufgeteilt werden. Die Hoheitsfunktion stellt Versorgungsverpflichtungen, die Aufrechterhaltung der öffentlichen Ordnung und die Einhaltung von Gesetzen sicher. Hoheitliche Aufgaben stellen den nicht delegierbaren Teil der Verantwortung der öffentlichen Hand dar und werden somit autonom von einer staatlichen Stelle erfüllt. Ziele einer ÖPP aus der Perspektive der öffentlichen Hand sind die Aktivierung privaten Kapitals und die Nutzung privaten Know-hows um die Effizienz insgesamt zu steigern und öffentliche Haushalte zu entlasten.

In der Regel vergibt die öffentliche Hand im Rahmen eines ÖPP-Modells im Straßeninfrastrukturbereich eine Konzession über eine Laufzeit von 30 Jahren. In dieser Periode ist der anfängliche Aus- oder ggf. Neubau eines Bauwerks sowie der anschließende Betrieb inkludiert. Nach Ablauf des Konzessionszeitraums fällt der Streckenabschnitt zu vorher vertraglich festgelegten Zustandsbedingungen an die öffentliche Hand zurück.

In Deutschland liegen praktische Erfahrungen mit der Anwendung von ÖPP-Modellen für den Bereich der Straßenbaufinanzierung derzeit nur in beschränktem Umfang vor. Mit Ausschreibung der F- und A-Modelle wurde zum ersten Mal eine Möglichkeit zur Zweckbindung von Mauteinnahmen und somit der Einstieg in die Nutzerfinanzierung vorgenommen. Als F-Modelle werden Betreibermodelle bezeichnet, die auf Grundlage des Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetzes (FstrPrivFinG) [22] realisiert werden. Das Anwendungsgebiet des 1994 in Kraft getretenen Gesetzes ist aus EU-rechtlichen Gründen auf besonders investitionsintensive, zusätzlich zum bestehenden Infrastrukturangebot errichtete Kunstbauwerke wie Tunnel, Brücken und Gebirgspässe beschränkt. Im Rahmen des F-Modells werden Benutzungsgebühren für Pkw und Lkw erhoben, die als Refinanzierungsmaut direkt in die Projekte zurückfließen. Bei der Benutzungsgebühr handelt es sich um eine öffentliche Gebühr, deren Höhe mittels einer Mautverordnung erlassen wird. Gemäß Konstruktion des FstrPrivFinG ist die Mautverordnung das Regulierungsinstrument der öffentlichen Hand. Derzeit befinden sich in Deutschland zwei Tunnel zur Querung von Gewässern, der Warnowtunnel in Rostock (Eröffnung September 2003) und der Travetunnel in Lübeck (Eröffnung August 2005), in Betrieb. Das A-Modell ist ein Betreibermodell für den Ausbau von Autobahnen. Refinanziert werden die Projekte mit Hilfe der streckenbezogenen Lkw-Maut sowie einem staatlichen Zuschuss, für die mautfreie Nutzung mit Pkw. Im Mai 2007 wurde die erste Konzession, die auf dem Konzept der A-Modelle beruht, vergeben. Hauptmerkmale und Unterschiede zum F-Modell sind, dass der private Konzessionsnehmer beim A-Modell die Maut nicht selbst erhebt, die Lkw-Maut wird vielmehr mittels Erfassungssystem bestimmt und über den Bund an den Streckenbetreiber weitergeleitet. Des Weiteren besteht der Unterschied, dass beim F-Modell die erhobene Nutzergebühr direkt in das Projekt fließt, wohingegen beim A-Modell nur ein Teil der Lkw-Maut zur Refinanzierung der A-Modelle zur Verfügung steht.

Aus Sicht des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung [48] wird durch die Einführung von ÖPPs im Bundesfernstraßenbau eine „schnellere Umsetzung von Maßnahmen des Bedarfsplans für die Bundesfernstraßen und Effizienzgewinne in wirtschaftlicher und struktureller Hinsicht beim Bau, dem Betrieb und der Erhaltung“ erwartet. Darüber hinaus „können durch diese Form der Einbindung Privater Innovationen in das Anlagevermögen Verkehrsinfrastruktur zielgerichtet weiter entwickelt werden.“

Wie Hofmann und Leitner [99] kritisieren, steht die seit Jahren praktisch unveränderte Finanzierungspraxis der Straßeninfrastruktur in Deutschland jedoch im Widerspruch zu einer lebenszyklusbezogenen Aufgabenwahrnehmung. Zur Begründung dieser These wird von den Autoren angeführt, dass die Länder als Handlungsbevollmächtigte des Bundes Bauaufträge für den Aus- und Neubau der Fernstraßen an private Dienstleister vergeben. Somit fungiert das Land zwar als der Besteller der Leistung, die Zahlung der Leistung erfolgt hingegen durch den Bund. Durch diese Trennung von Kompetenzen sind die Voraussetzungen für einen effizienten Mitteleinsatz nicht gegeben. Auf den in Kapitel 3 erläuterten Lebenszykluskostenansatz sowie die konsequente Weiterentwicklung und Anwendung auf die Finanzierung von Straßentunnelbauwerken in den Kapiteln 4 bis 6 soll an dieser Stelle bereits verwiesen werden.

2.5 Ansätze zum wirtschaftlichen Handeln in derzeit gültigen Regelwerken

2.5.1 Einführung

Aufgrund der Tatsache, dass Straßentunnel in Deutschland, wie an früherer Stelle gezeigt wurde, keine lange Betriebshistorie aufweisen, sind in den letzten 15 Jahren umfangreiche technische Vorgaben neu erarbeitet oder weiter präzisiert worden. In Tabelle 5 ist eine Auswahl an nationalen Regelwerken aufgeführt, die bei der Planung sowie bei der Konzeptionierung der Bau- und Betriebsphase eines Straßentunnels zu beachten ist. Während einzelne Richtlinien genau einer Phase zugeordnet sind, haben andere Richtlinien phasenübergreifenden Charakter. Die in Tabelle 5 aufgeführte Auswahl erhebt keinen Anspruch auf Vollständig-

keit und wurde lediglich vor dem Hintergrund getroffen, dass ein eindeutiger Bezug zu wirtschaftlichen Handlungsweisen gegeben ist.

	Betriebsphase		
	Bauphase		
	Planungsphase		
Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 25/1998 „Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel“, veröffentlicht am 28. Juni 1998 [33] → Abschnitt 2.5.2	•		
Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 6/2000 „Straßenquerschnitte in Tunneln“ mit der Anlage "Verfahren zur Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln", veröffentlicht am 22. Februar 2000 [34] → Abschnitt 2.5.3	•		
Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen für Ingenieurbauten (ZTV-ING) Teil 5 – Tunnelbau, Abschnitt "Betriebstechnische Ausstattung", Ausgabe Dezember 2007 [19] → Abschnitt 2.5.4	•	•	•
Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln, Ausgabe Dezember 2007 [16] → Abschnitt 2.5.5	•	•	•
Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 10/2006 „Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln“ mit der Anlage "Richtlinie für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)", veröffentlicht am 27. April 2006 [72] → Abschnitt 2.5.6	•	•	•
Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung - ABBV), veröffentlicht am 01. Juli 2010 [32] → Abschnitt 2.5.7			•

Tabelle 5: Richtlinien, die wirtschaftliche Aspekte zu Tunnelplanung und -betrieb beinhalten

Die Ausführungen in den Abschnitten 2.5.2 bis 2.5.7 beschränken sich inhaltlich weitgehend darauf, die Ansatzpunkte der in Tabelle 5 aufgeführten Richtlinien bezüglich eines nachhaltigen und wirtschaftlich effizienten Betriebs eines Straßentunnels aufzuzeigen. Dabei werden maßgeblich die Aspekte wiedergegeben, die eine Reduktion der Planungs- und Baukosten sowie der Betriebs- und Instandhaltungskosten auslösen. In den Regelwerken kommt teilweise sehr deutlich zum Ausdruck, dass frühere Planungs- und Betriebsgrundsätze als überholt gelten und durch aktuelle ökonomische Überlegungen ersetzt worden sind.

Die Zielstellungen einer lebenszykluskostenorientierten Planungs- und Betriebsphilosophie im Sinne der Richtlinien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Bauherrn, Betreiber und Planer erhalten Empfehlungen, das technische Design und den Betrieb eines Straßentunnels effizient zu gestalten. Da es sich in der Regel bei den Empfehlungen um nichtverbindliche Optionen handelt, soll eine Sensibilisierung zur Umsetzung neuer Lösungen abseits bekannter und bewährter Standards erreicht werden.
- Insbesondere für Straßentunnel, die nach einer Vorgängerversion einer Richtlinie geplant wurden oder für die zum Zeitpunkt der Planung einzelne Richtlinien noch nicht existierten, ist ein Abgleich zwischen dem Status quo des aktuell existierenden Tunnelbauwerks und den optionalen Empfehlungen in aktuell gültigen Richtlinien vorzunehmen. Es ist davon auszugehen, dass im Zuge sich abzeichnender Modernisierungs- und Instandhaltungskampagnen Effizienzvorteile erreicht werden können.

Die Empfehlungen sind im Zuge von Variantenvergleichen in einzelnen Lebenszykluskostenmodellen gegenüberzustellen. Hierzu wird auf die Ausführungen in den Kapiteln 5 und 6 verwiesen.

2.5.2 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 25/1998: Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“

Der Präsident des Bundesrechnungshofes als Bundesbeauftragter für Wirtschaftlichkeit in der Verwaltung führt in [38] aus, dass in den 1990er Jahren in einem ländlich geprägten Raum mit überwiegend intensiv genutzten Ackerflächen im Verlauf einer Bundesfernstraße statt eines preiswerten Einschnitts ein Tunnelbauwerk geplant und ausgeführt wurde. Der Bund musste durch diese Fehlentscheidung zusätzlich rund 20 Mio Euro investieren. Verknüpft mit der Tatsache, dass Bau- und Betriebskosten von Tunneln stetig zunehmen, wurden allgemeingültige Kriterien und Verfahren erarbeitet, die Entscheidungsträger bei der Abwägung zwischen einer Einschnitts- und einer Tunnellösung unterstützen.

Der Leitfaden für die Planungsentscheidung „Einschnitt oder Tunnel“ des Bundesministeriums für Verkehr [33] ist anzuwenden, wenn für die Planung einer Neubaumaßnahme im Zuge einer Bundesfernstraße eine auf wirtschaftlichen Überlegungen basierende Entscheidung zu treffen ist. Als Ausführungsalternativen stehen verschiedene Einschnittslösungen geeigneten Tunnelbauvarianten gegenüber. Aus technischer Sicht ist die Anwendung des Bewertungsverfahrens auf Lösungen beschränkt, bei denen eine oberflächennahe Straßenlage gegeben ist. Der Anwender dieser Richtlinie erhält nach Ausführung der im Leitfaden aufgezeigten Bearbeitungsschritte eine Bewertungsmatrix, die in den endgültigen Entscheidungsprozess einzubeziehen ist.

Die Anwendung des Leitfadens kommt „nur bei einer oberflächennahen Lage der Straße in Betracht, wobei erfahrungsgemäß die wirtschaftliche Grenze für eine Einschnittslösung bei max. 30 m liegt“. Ferner beschränkt sich der zu untersuchende Regelfall auf eine Überlandverbindung außerhalb bebauter Fläche.

Die Abschätzung einer Reihe unterschiedlicher Kriterien mündet in einem Bewertungsverfahren, das eine Kombination aus der Nutzwertanalyse und der Kapitalwertmethode abbildet. Während die Nutzwertanalyse verbale, also nicht-monetäre Bewertungsmaßstäbe verwendet, sind die Eingangsgrößen der Kapitalwertmethode ausschließlich monetärer Art. Die Verknüpfung beider Verfahren ermöglicht somit die gleichzeitige Bewertung von Kosten auf der einen Seite und Kriterien aus ökologischen, verkehrlichen oder sicherheitsrelevanten Überlegungen auf der anderen Seite. Ziel der Durchführung des Bewertungsverfahrens ist es, die ökonomisch vorteilhafteste Ausführungsvariante zu ermitteln. Aufgrund der Verschiedenartigkeit von Kriterien kann, wie in [33] aufgeführt, die Beschreibung nach vier unterschiedlichen Systematiken erfolgen:

- „direkte monetäre Angaben aufgrund verfügbarer Marktpreise,
- indirekte monetäre Angaben aufgrund von Vergleichsbetrachtungen,
- nicht-monetäre, aber zahlenmäßige Angaben in anderen Maßeinheiten,
- Beschreibung über eine verbale Vorteils- und Nachteilsdarstellung.“

Der Leitfaden gibt zur weiteren Bearbeitung ein leeres Tabellenwerk vor, das verschiedene Aspekte zu den Oberkriterien Kosten, Verkehr, Technik, Natur-, Immissions-, Gewässerschutz, Landwirtschaft und Sonstige aufführt. Sukzessive sind nach der oben beschriebenen Systematik sämtliche zutreffende Kriterien monetär, nicht-monetär oder verbal zu beschreiben. Ist die Tabelle vollständig gefüllt, so wird der abschließende Bewertungsprozess durchgeführt. Dabei wird jedes Kriterium für jede alternative Ausführungsart nach der in Tabelle 6 aufgeführten Einstufung priorisiert.

Wertung	Zielerreichung	Beeinträchtigung
++	beste	kleinste
+	gute	kleine
0	durchschnittliche	durchschnittliche
-	schlechte	große
--	schlechteste	größte
/	entfällt	

Tabelle 6: Kriterienbewertung, nach [33]

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist schließlich zu beachten, dass den Kriterien untereinander nicht immer die gleiche Bedeutung zugemessen werden kann, sodass gegebenenfalls eine zusätzliche Gewichtung der Kriterien zu berücksichtigen ist.

2.5.3 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 6/2000: Straßenquerschnitte in Tunneln

Das ARS 6/2000 [34] des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen beinhaltet ein Verfahren zur Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln unter Einbeziehung verkehrlich prognostizierter Randbedingungen. Neben einem Begleittext des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Wohnungswesen umfasst das ARS 6/2000 die Anlage „Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln“, die durch Brilon und Lemke vom Lehrstuhl für Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum erarbeitet wurde. Diese Richtlinie findet Anwendung bei Neubauprojekten, beispielsweise auch dann, wenn neben einer bestehenden eine weitere Röhre ergänzt wird.

Wurden in der Vergangenheit bei der Auswahl eines Tunnelquerschnitts die reinen Baukosten und alle maßgeblichen Kosten seitens der Straßennutzer berücksichtigt, so werden mit der Einführung des Allgemeinen Rundschreibens 6/2000 erstmals die Betriebs- und Unterhaltungskosten, die durch den Tunnelbetreiber aufzubringen sind, mit in die Bewertung einbezogen. Der Entscheidungsprozess zielt also im Sinne eines wirtschaftlichen Tunnelbetriebs nunmehr nicht nur auf die Investitionskosten, sondern auch auf die aus der Errichtung des Bauwerks resultierenden Folgekosten ab.

Generell wird in [34] im Weiteren die Auffassung vertreten, dass es durchaus gerechtfertigt ist, die Abmessungen des Straßenquerschnitts gegenüber der freien Streckenführung geringfügig einzuschränken und somit die Baukosten zu verringern. Als Begründung werden umfangreiche Untersuchungen über die Verkehrssicherheit in Straßentunneln angeführt. Diese hatten zu dem Ergebnis geführt, dass in Tunneln die maßgeblichen Unfallkenngrößen bei zweibahnigen Straßen etwa nur die Hälfte und bei einbahnigen Straßen etwa ein Drittel der entsprechenden Kenngrößen der außerhalb der Tunnel liegenden Strecken betragen. Die bauwerksspezifischen Charakteristika, die zu einer Verringerung des Unfallgeschehens im Tunnel im Vergleich zur freien Strecke führen, wurden bereits in Abschnitt 2.2 aufgeführt.

Wenn nicht triftige Gründe widersprechen, so wird auf den Bau eines Seitenstreifens in Tunneln im Allgemeinen verzichtet. Neben einem beidseitigen Notgehweg sind ab einer Tunnellänge von 900 m bzw. bei erhöhtem Lkw-Aufkommen bereits ab einer Länge von 600 m Nothaltebuchten vorzusehen. Eine Nothaltebucht zeichnet sich durch eine etwa 50 m lange Tunnelaufweitung aus, wobei der Abstand zwischen zwei Buchten 600 m nicht überschreiten soll. Existieren im Tunnel zwei Richtungsfahrbahnen, so kommt, wie in Abbildung 9 dargestellt, der Querschnittstyp 26 t, bei drei Fahrbahnen der Typ 33 t zur Ausführung. Wird hingegen aufgrund der verkehrlichen Voraussetzungen der Bau eines Seitenstreifens in der Tunnelröhre erforderlich, so ist dieser aus Kostengründen auf 2,00 m Breite zu beschränken. Bei zwei Richtungsfahrbahnen kommt dann der Straßenquerschnittstyp 26 T, bei drei Fahrbahnen der Typ 33 T zum Einsatz. Der Sonderquerschnittstyp 29,5 T verfügt allerdings bei zwei Richtungsfahrbahnen über einen Standstreifen mit 2,50 m Breite und weist somit gegenüber der freien Streckenführung unverminderte Abmessungen auf. Der Typ 29,5 T repräsentiert nur in Sonderfällen bei außergewöhnlich kostengünstiger Bauweise und bei sehr kurzen Tunneln eine geeignete Variante. Wird der Tunnel im Lockergestein mit einer Schildmaschine aufgeföhren, so bietet sich der Straßenquerschnittstyp 26 Tr mit einem schmalen durchgehenden Standstreifen als Ersatz für die bei diesem Tunnelbauverfahren sehr ausführungintensiven Nothaltebuchten an. Für Richtungsverkehrstunnel sind in Abbildung 9 die zuvor erläuterten Straßenquerschnitte gegenübergestellt.

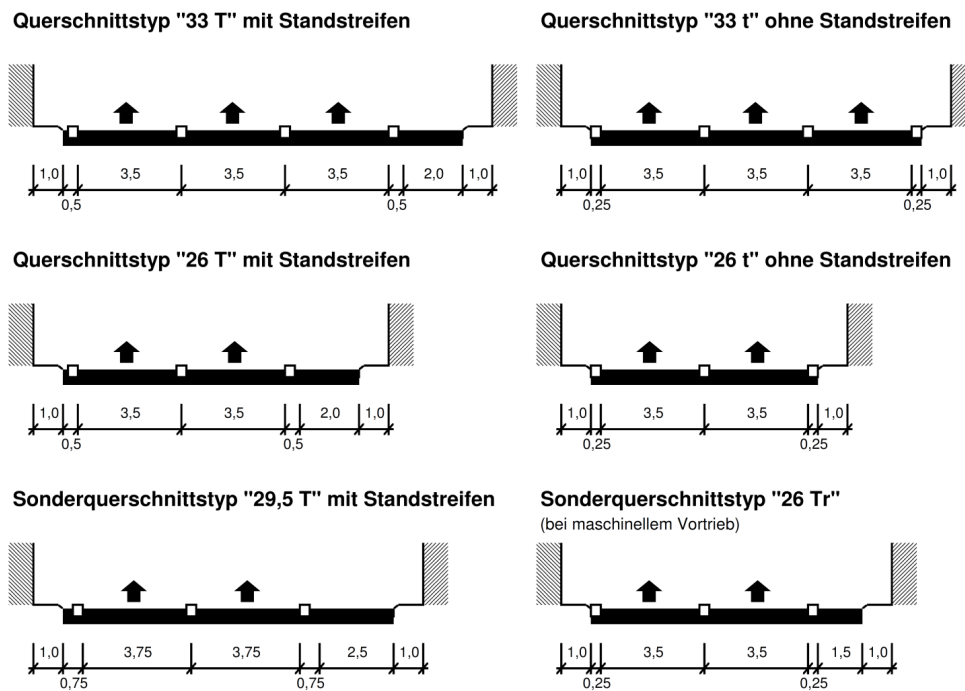


Abbildung 9: Straßenquerschnittstypen bei Richtungsverkehrstunneln, nach [72]

Beim Vergleich der verschiedenen Ausführungsvarianten werden die mittleren jährlichen Baulasträgerkosten je Meter Tunnelänge berücksichtigt, die für den Querschnitt mit Standstreifen (Typendung „T“) im Gegensatz zum Querschnitt ohne Standstreifen (Typendung „t“) aufzubringen sind. Insbesondere hat ein Standstreifen Auswirkungen auf die vorzuhaltende Beleuchtungsstärke und die Dimensionierung der Lüftung. Nach Brilon und Lemke (in [34] enthalten) liegen die jährlichen Folgekosten (Preisstand 2000), die durch die Realisierung des Typs 26 T gegenüber dem Typ 26 t nur aufgrund einer umfangreicheren technischen Ausstattung entstehen, in Abhängigkeit von der Tunnelänge zwischen netto 110 €/m (250 m Tunnelänge) und 30 €/m (2.000 m Tunnelänge).

2.5.4 ZTV-ING, Teil 5 – Tunnelbau, Abschnitt 4

Die Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING) [19] stellen ein Regelwerk für den Ingenieurbau dar und werden durch die Bundesanstalt für Straßenwesen herausgegeben. Sie behandeln die Bemessung, Konstruktion und Ausführung von Ingenieurbauwerken und spiegeln den Inhalt mehrerer nationaler und internationaler Normen wider. Ändern sich normative Vorgaben, so wird in regelmäßigen Abständen auch eine Überarbeitung der ZTV-ING erforderlich. Der fünfte Teil der ZTV-ING behandelt den Tunnelbau und ist wiederum in fünf Abschnitte unterteilt. Neben der geschlossenen, der offenen und der maschinellen Bauweise werden die betriebstechnische Ausstattung und die Tunnelabdichtung behandelt. Im Folgenden soll der Abschnitt „Betriebstechnische Ausstattung“ näher betrachtet werden.

In Absatz 2.3.1 („Gebrauchsdauer – Allgemeines“) wird gefordert, dass zur Sicherstellung einer langen Gebrauchsdauer der betriebstechnischen Ausstattung die Bau- und Anlagenteile eine den starken korrosiven Angriff berücksichtigende Konstruktion aufweisen müssen. Unter der Überschrift „Sonstige konstruktive Gestaltung“ wird in Abschnitt 2.4.4 [19] ausgeführt, dass zur Minimierung der Dauer von Verkehrsbehinderungen aufgrund von Arbeiten zur Störungsbeseitigung oder Instandhaltung auszutauschende Teile leicht zugänglich und in kurzer Zeit austauschbar sein müssen. Zudem sind Leuchten so zu gestalten, dass sie maschinell gereinigt werden können.

Um Betrieb und Instandhaltung effizient zu gestalten, ist, wie im Absatz „Dokumentation“ geschildert, über die ausgeführten Leistungen Buch zu führen. Zudem sind Betriebs- und Wartungsunterlagen für jede selbstständig funktionierende und einzeln zu wartende Anlage getrennt aufzustellen. Arbeitskarten mit Kurzbeschreibung der Anlagenteile, die Art der Inspektions- und Wartungsarbeiten gehören ebenso zu den Betriebs- und Wartungsunterlagen wie auch die Vorgabe von Rhythmen, in denen die Arbeiten zu wiederholen sind.

2.5.5 RI-BWD-TU: Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln

Bei Tunneln, die geologische Schichtungen mit Sickerwasservorkommen durchörtern, stellen Bergwasserdränagen gegenüber einer vollständig abgedichteten und auf Wasserdruck bemessenen Tunnelinnenschale ein wirtschaftliches, wenn auch nicht wartungsfreies Lösungskonzept dar. Kommt es aufgrund ausgelöster Spritzbetonbestandteile oder natürlicher Kalkvorkommen im Gebirge zu einer erhöhten Aggressivität des Bergwassers und somit zu Calcitabscheidungen, können nach Thewes et al. [155] Versinterungserscheinungen anfänglich zu weichen, später zu festen Ablagerungen (Inkrustationen) im Dränagerohr führen. Diese sind mittels Hochdruckspülung zu lösen und vollständig aus dem Dränagesystem zu entfernen. Die durch die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlichte „Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln“ (RI-BWD-TU) [16] macht detaillierte Vorgaben für Planung, Ausführung und Betrieb solcher Entwässerungsanlagen. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Instandhaltungs- und versinterungsbedingten Wartungskosten für Dränagesysteme zu reduzieren, da diese „einen nicht unerheblichen Teil der Wartungskosten ausmachen“. Als Mindeststandard dieser Richtlinie wird ein wartungsarmes und funktionssicheres Grundsystem definiert, bei dem alle wasserfassenden und wasserableitenden Komponenten eine möglichst geringe Versinterungsneigung und eine hohe Robustheit gegenüber mechanischer Beschädigung aufweisen müssen.

Damit die in Abschnitt 2.2 der Richtlinie [16] als Grundsystem bezeichnete Lösung möglichst lange ihre Funktionsfähigkeit behält, werden Mindestanforderungen aufgeführt, die bei der Planung der Spritzbetonaußenschale, der Wahl von Dränagerohr und Filterkiesummantelung sowie bei der Anordnung von Revisionschächten zu beachten sind. Der Betrieb von Bergwasserdränagen wird im vierten Abschnitt der Richtlinie thematisiert, wobei besonders auf die Festlegung und Anpassung von Inspektionsrhythmen sowie auf die verschiedenen Arten der Zustandserfassung und der Ergebnisdokumentation eingegangen wird. Schließlich werden Möglichkeiten aufgezeigt, nachträgliche Maßnahmen zu ergreifen, die zur Verringerung des versinterungsbedingten Wartungsaufwandes führen.

2.5.6 Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) 10/2006: Betriebstechnische Ausstattung von Straßentunneln

Von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen wurden im Jahr 1985 erstmals die „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ (RABT) herausgegeben. Inhaltlich wurden nach Baltzer [7] in den RABT 1985 verschiedene Elemente wie Beleuchtung, Lüftung, Lösch- und Brandmeldeeinrichtungen sowie Betriebs- und Erhaltungskonzepte behandelt. In dieser ersten Version wurde beispielsweise für den Bau von Fluchtwegen gefordert, dass diese „in regelmäßigen Abständen angeordnet werden, die bei zweiröhriigen Tunneln in der Regel in die Nachbarröhre führen und einen Abstand von 300 m aufweisen. Bei einröhriigen Tunneln sollten, soweit es die topografischen Verhältnisse zulassen und es mit vertretbarem Aufwand möglich ist, Fluchtwege ins Freie angeordnet werden.“ Im Jahr 1994 wurden überarbeitete und ergänzte Richtlinien veröffentlicht, wobei der Personenschutz, so Baltzer in [7] weiter, von nun an in den Vordergrund rückte. Frühere optionale Regelungen, die in Verbindung mit dem Schutz des Verkehrsteilnehmers in Tunneln stehen, wurden in verpflichtende Vorschriften umformuliert. Eine weitere Novellierung der RABT im Jahr 2003 wurde durch die schweren Brandkatastrophen in alpinen Gegenverkehrstun-

neln (vgl. Abschnitt 2.2) ausgelöst. Als Konsequenz wurde beispielsweise das Tunnelbeleuchtungsniveau erhöht, die Notausgangsabstände auf mindestens 300 m verkürzt, die Längslüftung je nach Betriebsart des Tunnels auf 600 m (bei Gegenverkehr) bzw. 3.000 m (bei Richtungsverkehr) begrenzt und Sperrmöglichkeiten am Tunnelportal neu eingeführt. Die Veröffentlichung der europäischen "Richtlinie 2004/54/EG" [66] über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz machte eine Umsetzung der Vorgaben in nationales Recht erforderlich. Die Veröffentlichung des ARS 10/2006 kommt den Forderungen der EU-Kommission nach und führt verbindlich die überarbeitete RABT 2006 [72] für Tunnel, die sich in der Baulast des Bundes befinden, ein. Wesentliche Ergänzungen betreffen die Einführung neuer Organe wie den Tunnelmanager und den Sicherheitsbeauftragten, die Anforderungen an die Sicherheitsdokumentation und die Durchführung von Risikoanalysen für den Fall, dass von den in den Richtlinien geforderten Vorgaben bei Gewährleistung eines gleich- oder höherwertigen Sicherheitsniveaus abgewichen werden soll.

In Abschnitt C.4 des ARS 10/2006 [72] wird explizit darauf hingewiesen, dass über die in den RABT 2006 genannten Regelungen hinaus zu beachten ist, dass eine zulässige Höchstgeschwindigkeit in Tunneln von 80 km/h als Bemessungsgröße nicht zu überschreiten ist. Als Begründung wird angeführt, dass „eine generelle Erhöhung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit auf beispielsweise 100 km/h wegen der damit verbundenen Kostensteigerung für den Beleuchtungsaufwand und die jährlichen Betriebskosten für die Beleuchtung um das 2- bis 3- fache zu Lasten des Bundeshaushaltes“ nicht zu vertreten ist.

Der erste Kapitel der RABT 2006 ist mit „Organisation und Betrieb“ überschrieben und beinhaltet einen Absatz, der die Verwaltungsbehörde auf Antrag des Tunnelmanagers ermächtigt, Ausnahmen von den Anforderungen dieser Richtlinie zuzulassen. Insbesondere ist hiermit die Verwendung innovativer Sicherheitseinrichtungen oder -verfahren gemeint, wenn diese im Vergleich zum heutigen Stand der Technik, der den Vorgaben der Richtlinie zugrunde liegt, einen gleichwertigen oder höheren Schutz bieten. Im Zuge der Erörterung der Themen Störungsbeseitigung und Instandhaltung wird darauf hingewiesen, personalintensive Arbeiten wie Leuchtmittelwechsel und Leuchtenreinigung immer an Wartungsfirmen zu übertragen. Rückblickend hat es sich bewährt, mit der Installation der technischen Ausstattung auch die Instandhaltung für 5 Jahre zuzüglich der Option auf eine Vertragsverlängerung an einen Dritten zu beauftragen. Hierdurch können, so die Ausführungen weiter, „Konflikte zwischen Instandhaltung und Gewährleistung vermieden werden“.

Das zweite Kapitel „Verkehrsraum Tunnel“ behandelt unter anderem die Wahl von Straßenquerschnitten in Tunneln und verweist im Wesentlichen auf die Inhalte des ARS 6/2000, die bereits in Abschnitt 2.5.3 aus wirtschaftlicher Sicht näher erläutert wurden.

Die Beleuchtung in Straßentunneln übt, wie bereits schon an früherer Stelle erwähnt, Einfluss auf die Anschaffungskosten, in noch stärkerem Maße aber auf die dauerhaft anfallenden Energiekosten aus. Das dritte Kapitel der RABT setzt sich mit der Ausleuchtung von Tunnelstrecken auseinander. Es wird dargelegt, dass das gewählte Beleuchtungsniveau das Ergebnis einer Abwägung zwischen den Sicherheitsanforderungen und den Kosten ausdrückt. Nach DIN 67524-1 [57] werden Tunnel in lichttechnisch lange und kurze Tunnel unterteilt. Bei einem lichttechnisch langen Tunnel ist die Tunnelausfahrt aus Haltesichtweite vor der Tunnel-einfahrt nicht sichtbar bzw. das Verhältnis der Tunnellänge zur Tunnelbreite größer als 5:1. Nach Definition der DIN 67524-1 ist die Haltesichtweite die Strecke, die der Kraftfahrer benötigt, um sein Fahrzeug vor einem unerwarteten Hindernis auf der Fahrbahn – im konkreten Fall noch vor der Einfahrt in den Tunnel – zum Halten zu bringen. Bei den Anforderungen an die Beleuchtungsanlage in lichttechnisch langen Tunneln wird zwischen sogenannten Wartungs- und Planungswerten unterschieden. Der Wartungswert der Leuchtdichte L_W ist der Wert, der zu keinem Zeitpunkt des Betriebes der Beleuchtungsanlage unterschritten werden darf. Der Planungswert der Leuchtdichte L_{PI} ergibt sich aus dem Produkt von Wartungswert und Planungsfaktor f_{PI} , also $L_{PI} = f_{PI} * L_W$. Der Planungsfaktor f_{PI} hängt von der Lampenlebensdauer, den vorgesehenen Reini-

gungsintervallen der Beleuchtungsanlage und der Reflexionsfähigkeit der Tunnelwände sowie der Art der Steuerung bzw. Regelung der Beleuchtungsanlage ab und ist nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu wählen.

Die Zufahrt zu einem Tunnel sowie die eigentlich abgedeckte Straßenführung untergliedern sich, wie in Abbildung 10 gezeigt, in Anlehnung an DIN 67524-1 [57] in mehrere Teilstrecken, an die unterschiedliche lichttechnische Anforderungen gestellt werden.

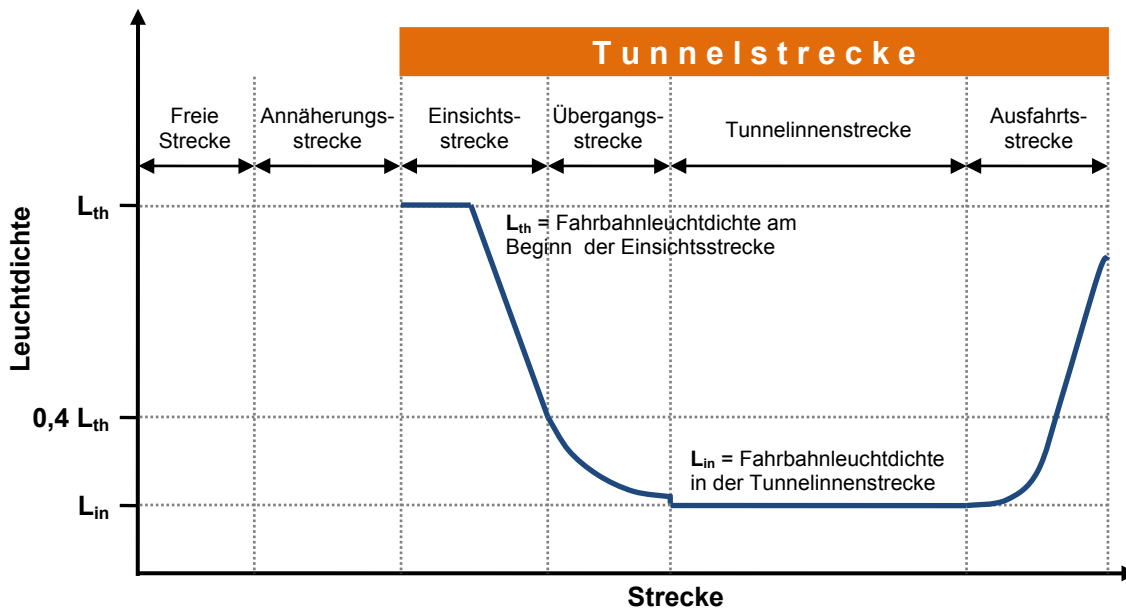


Abbildung 10: Lichttechnische Anforderungen in Abhängigkeit vom Standort im Tunnel, nach [57]

Wie aus Abbildung 10 hervorgeht, erfordert die Einsichtsstrecke, um eine Adaption des menschlichen Auges beim Übergang von der freien Strecke in den Tunnel bei Tageslichtverhältnissen zu ermöglichen, eine hohe Fahrbahnleuchtdichte. Da die maximal erforderliche Leuchtdichte nur an wenigen Stunden im Jahr nötig ist, kann diese unberücksichtigt bleiben, wenn die zulässige Höchstgeschwindigkeit auf der Annäherungsstrecke und im Tunnel in dieser Zeit entsprechend reduziert wird. Durch diese Maßnahme wird die Haltesichtweite herabgesetzt und das Zeitintervall zur Anpassung des Auges an die veränderten Lichtverhältnisse verlängert. Die RABT 2006 führen zudem bauliche Maßnahmen in der Annäherungsstrecke auf, die sich unmittelbar auf die Höhe der Investitions- und Betriebskosten einer Beleuchtungsanlage auswirken können. So sind die Fahrbahnoberfläche der freien Strecke, die Portalfassaden und ggf. umliegende Stützmauern dunkel zu gestalten. Kommt im Tunnel eine bituminöse Deckschicht zur Ausführung, so ist diese, um bessere Reflexionseigenschaften zu erzielen, aufzuhellen. Die Tunnelwände sind bis zu einer Höhe von 3 m konstruktiv hell zu gestalten, beispielsweise durch die Verwendung aufgehellten Sichtbetons. Um ein annähernd vergleichbares Sicherheitsgefühl über die gesamte Tunnellänge zu vermitteln, erfordern dunkle Tunnelwände ein durchgängig höheres Beleuchtungsniveau und somit eine erhöhte Dimensionierung der Beleuchtungsanlage.

Dringt Tageslicht über das Portal in den Tunnel, können bei einem Rechteckquerschnitt die ersten fünf Meter und bei einem Gewölbequerschnitt die ersten zehn Meter der Einsichtsstrecke unbeleuchtet bleiben. Nach der halben Einsichtsstrecke ist die Leuchtdichte bis zum Ende der Einsichtsstrecke kontinuierlich oder in Stufen auf 40% des Anfangswertes abzusenken.

Die Fahrbahnleuchtdichte muss bei Nacht für Tunnel, die mit einer Tagbeleuchtung ausgerüstet sind und im Zuge unbeleuchteter Strecken liegen, einen Wartungswert von $0,5 \text{ cd/m}^2$ bei Richtungsverkehr bzw. $0,8 \text{ cd/m}^2$ bei Gegenverkehr aufweisen. Bei Tunneln, die im Zuge beleuchteter Strecken liegen, muss die

Leuchtdichte der Tunnelstrecke mindestens der Leuchtdichte der Anschlussstrecken entsprechen. Die Werte der Nachtbeleuchtung können jedoch angehoben werden, wenn aus den technischen Maßnahmen zur Realisierung der Mindestwerte kein ausgewogenes Kosten-Nutzen-Verhältnis abgeleitet werden kann.

In der Regel führt eine Gegenstrahlbeleuchtung gegenüber der symmetrischen Beleuchtung bei gleichem Lichtstrom zu höheren Leuchtdichten auf der Fahrbahnoberfläche und zu höheren negativen Kontrasten gegenüber der Fahrbahnoberfläche der Einsichtsstrecke. Daher ist für die Beleuchtung der Einsichts- und Übergangsstrecken aus wirtschaftlichen Gründen eine Gegenstrahlbeleuchtung vorzusehen. Als Leuchtmittel kommen heute Natriumdampf-Hochdrucklampen zur Anwendung. Andere Lampen können dann eingesetzt werden, wenn dadurch eine Wirtschaftlichkeit erreicht wird, die mindestens der Wirtschaftlichkeit von Natriumdampflampen gleichkommt. Die Anordnung der Leuchten wird vom Tunnelquerschnitt einerseits und von licht- und wartungstechnischen Kriterien andererseits bestimmt. Nach Möglichkeit soll eine einreihige Leuchtenanordnung gewählt werden. Auch bei einer Eckanordnung der Leuchten ist für die Einsichts- und Übergangsstreckenbeleuchtung in der Regel eine Gegenstrahlbeleuchtung vorzusehen. Die entsprechenden Varianten zur Anordnung der Leuchten sind in Tabelle 5 der RABT 2006 [72] dargestellt.

Die Lüftungsdimensionierung und -steuerung werden im vierten Kapitel thematisiert. Es wird darauf hingewiesen, dass die Dimensionierung eines geeigneten Lüftungssystems auf Optimierungsrechnungen basieren soll. Die Auslegung der gesamten Lüftungsanlage wird im Wesentlichen durch Brandszenarien im Tunnel bestimmt. Entsprechende Werte für die Brandleistung und die Menge der entstehenden Rauchgase werden in Abhängigkeit von den täglich zu erwartenden Lkw-Kilometern pro Röhre vorgegeben. Es wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass die Dimensionierung der Lüftung für eine nach einer Brandleistung von 100 MW im Falle von über 6.000 Lkw-km pro Tag und Röhre bau- und anlagentechnisch nicht mehr sinnvoll darstellbar sein kann. Für einen solchen Fall ist im Sinne einer verbesserten Wirtschaftlichkeit eine Risikoanalyse durchzuführen. Aufgrund der hohen Leistungsaufnahmen, die durch das Starten der Lüftung entstehen, ist die Lüftungssteuerung so auszubilden, dass die vorgegebenen Lüftungsbedingungen mit geringem Energieaufwand erreicht werden können. Dabei sind häufige elektrische Schaltvorgänge zu vermeiden.

Die Sicherheitseinrichtungen, zentrale Einrichtungen und die Tunnelsteuerung werden in den Kapiteln sechs bis acht behandelt. Es wird explizit darauf hingewiesen, bei der Ausstattung des Tunnels mit Lautsprecheranlagen zu prüfen, ob z.B. durch ein schmalbandiges Frequenzspektrum sowie durch die Absenkung des Schallpegels eine Vergrößerung der Lautsprecherabstände erreicht werden kann. Im Hinblick auf den Betrieb von Entwässerungseinrichtungen ist beim Entwurf besonders auf die spätere Zugänglichkeit und weitgehende Wartungsfreundlichkeit zu achten. Bei der Auswahl einer Ersatzstromversorgungsanlage ist zu beachten, dass wartungsfreie, geschlossene Batterien verwendet werden. Um der technischen Weiterentwicklung gerecht zu werden und um einzelne Ebenen und Komponenten ersetzen, erneuern und erweitern zu können, müssen die Schnittstellen einer EDV-Tunnelsteuerung offen und genormt sein.

2.5.7 Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV

Kommt es im Zuge von Neu- oder Ausbau eines Verkehrsweges zu einer neu zu errichtenden oder anzupassenden baulichen Anlage im Zusammenhang mit einem weiteren, beispielsweise kreuzenden Verkehrsweg, so ist unter den beteiligten Baulastträgern die resultierende Differenz aus bisherigen und zukünftigen Erhaltungskosten, der sogenannte Ablösungsbetrag, zu ermitteln.

Der Ablösungsbetrag ist unter Abwägung der Rahmenbedingungen an den Baulastträger zu zahlen, der infolge der baulichen Veränderung Anspruch auf einen Ausgleich hat. Das systematische Vorgehen wird in der durch den Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zum 13. Juli 2010 novellierten „Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeiträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz“, kurz „Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung –

ABBV“ [32] aufgezeigt. Da diese Verordnung einerseits ein Verfahren zur Ermittlung von Bauwerkserhaltungskosten umfasst und andererseits Grenzwerte für theoretische Nutzungsdauern von Ingenieurbauwerken und Bauteilen beinhaltet, ergeben sich thematisch Anknüpfungspunkte zum nachhaltigen Betrieb von Verkehrsinfrastrukturbauwerken.

Zur Verdeutlichung der Problematik sei im Folgenden ein Beispiel gegeben. Eine bestehende Bahntrasse soll über ein neu zu erstellendes Trogbauwerk, welches sich vor dem Portal eines zukünftigen Straßenverkehrstunnels befindet, geführt werden. Die Überführung der zweigleisigen Strecke soll durch ein Rahmentragwerk, welches in das Trogbauwerk integriert wird, realisiert werden. Die Berechnungsverordnung sieht zunächst eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Gleistrasse vor; insbesondere sind Daten zum Jahr der verkehrsbereiten Fertigstellung, zur theoretischen Nutzungsdauer des betreffenden Gleisabschnittes sowie zu den jährlichen Unterhaltungskosten zu ermitteln. Die beiden zuletzt genannten Größen sind den entsprechenden Tabellenwerken im vierten Kapitel der Verordnung [32] zu entnehmen.

Anhand der gesammelten Daten sind anschließend zwei fiktive Entwürfe auf Preisbasis des beabsichtigten Ablösungszeitpunktes zu kalkulieren. Der erste Fiktiventwurf sieht vor, dass die Bahnstrecke auf Grundlage des derzeitigen Bestands bereits vor Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer zu erneuern ist. Ein zweiter Fiktiventwurf hingegen beinhaltet, dass die Bahnstrecke unter den geänderten Randbedingungen mittels Rahmentragwerk über den Vorportalbereich geführt wird. Im Zuge der Ausarbeitung beider Entwürfe sind sowohl die reinen Baukosten als auch die Kosten für Abbruch, Behelfszustände, Betriebserschwerisse und Verwaltung Gegenstand des Kalkulationsumfangs.

Unter Anwendung der in Abschnitt 2.3 der ABBV [32] angegebenen Berechnungsformel erfolgt anschließend die Ermittlung der kapitalisierten Erhaltungskosten für beide Fiktiventwürfe; dabei wird zwischen den ursprünglichen Kosten („alt“) und den zukünftigen Kosten („neu“) zur Erhaltung der jeweiligen baulichen Anlage differenziert. In Formel 2.1 sind für die nacheinander durchzuführenden Berechnungen „alt“ und „neu“ die entsprechenden Werte m , n , K_e , p und K_u einzusetzen.

$$E_{\text{alt}} \text{ bzw. } E_{\text{neu}} = \frac{\left(1 + \frac{z}{100}\right)^{m-n}}{\left(1 + \frac{z}{100}\right)^m - 1} \times K_e + \frac{p}{z} \times K_u \quad (\text{Formel 2.1})$$

wobei:

$E_{\text{alt}}, E_{\text{neu}}$ [€]	kapitalisierte Erhaltungskosten
z [%]	Zinssatz der Kapitalisierung, $z = 4\%$ in der ABBV
m [Jahre]	theoretische Nutzungsdauer der baulichen Anlage (gem. Tabellenwerk ABBV)
n [Jahre]	Restnutzungsdauer der baulichen Anlage
K_e [€]	Erneuerungskosten der baulichen Anlage (Summe der Kosten für Bau, Abbruch, Behelf, Erschwerisse und Verwaltung)
p [%]	Prozentsatz der jährlichen Unterhaltungskosten in Bezug auf die Größe K_u
K_u [€]	Kosten der baulichen Anlage (Summe der Kosten für Bau und Verwaltung)

Die kapitalisierten Erhaltungskosten drücken aus, welcher Betrag zum Referenzzeitpunkt dem unterhaltungspflichtigen Baulastträger zur Verfügung stehen muss, damit dieser in der Lage ist, das Bauwerk bis zum Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer zu erhalten. Für den ersten Fiktiventwurf ist dies der zu einem Zinssatz von 4% anzulegende Betrag, der über die Restnutzungsdauer zur baulichen Instandhaltung und zur Aufrechterhaltung des Betriebes aufzubringen ist. Aufgrund der Erstellung einer neuen baulichen Anlage kommt es allerdings nicht zu dieser Ausgabe, so dass dieser Betrag eingespart wird. In gleicher Weise werden die kapitalisierten Erhaltungskosten für die neue bauliche Anlage, die dem zweiten Fiktiventwurf ent-

spricht, ermittelt. In der Regel entspricht die theoretische Nutzungsdauer zum Ablösungszeitpunkt der Restnutzungsdauer. Die für beide Fiktiventwürfe ermittelten Erhaltungskosten werden abschließend gegenübergestellt. Das Ergebnis stellt den resultierenden Ablösungsbetrag A dar; es wird zwischen zwei Fällen unterschieden:

Fall 1: $E_{\text{neu}} > E_{\text{alt}} \geq 0$: $A = E_{\text{neu}} - E_{\text{alt}} \rightarrow$ Es handelt sich um Erhaltungsmehrkosten, die dem erhaltungspflichtigen Baulastträger von dem anderen Beteiligten abzulösen sind

Fall 2: $E_{\text{alt}} > E_{\text{neu}} \geq 0$: $A = E_{\text{alt}} - E_{\text{neu}} \rightarrow$ Es handelt sich um Erhaltungsminderkosten, die vom erhaltungspflichtigen Baulastträger dem anderen Beteiligten zu erstatten sind

Wie aus dem zuvor geschilderten Beispiel hervorgeht, basiert die Verlegung der Gleistrasse auf dem einseitigen Verlangen des Straßenbaulastträgers. Die Erhaltungspflicht der Gleisüberführung liegt nach Fertigstellung in der Hand des Baulastträgers des Schienenweges. Durchaus denkbar ist aber auch ein Szenario, bei dem beide Beteiligten ein Interesse an der Maßnahme haben. Bei einem solchen beiderseitigen Änderungsverlangen ist entsprechend der jeweiligen Anteile an den Baukosten der Ablösungsbeitrag aufzuteilen.

Für Tunnelbauwerke sind in Tabelle 7 die theoretischen Nutzungsdauern m sowie die jährlichen Unterhaltungskosten p in Bezug auf die Größe K_u aufgeführt. Bei den Nutzungsdauern wird zwischen geschlossener und offener Bauweise sowie nach betriebs- und verkehrstechnischen Ausstattungselementen für Straßentunnel unterschieden.

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

Tabelle 7: Theoretische Nutzungsdauern und Prozentsätze der jährlichen Unterhaltungskosten für Tunnel, nach [32]

Die Verordnung enthält weitere Tabellenwerke zu theoretischen Nutzungsdauern und jährlichen Unterhaltungskosten, beispielsweise für Trogbauwerke, Stützbauwerke, Ausstattungen von Straßen und Wegen sowie für Böschungsbefestigungen.

2.6 Anforderungen an eine zeitgemäße Bewirtschaftungsstrategie

Haben Tunnel beim Aufbau des Fernstraßennetzes bis in die 1970er Jahre in Deutschland eine sehr untergeordnete Rolle gespielt, so sind in den zurückliegenden drei bis vier Jahrzehnten Tunnelneubauten zur Beseitigung von Engpässen oder aus Gründen des Umweltschutzes errichtet worden.

Tunnelbauwerke weisen gegenüber der freien Streckenführung nicht nur sehr viel höhere Investitionskosten, sondern auch höhere Aufwendungen für den Betrieb und die Unterhaltung auf. Im laufenden Betrieb sind besonders die Energiekosten für die Beleuchtung und die Belüftung hervorzuheben, aber auch lohnintensive Wartungs- und Inspektionsarbeiten können eine beträchtliche Höhe erreichen.

Eine grundlegend überarbeitete Sicherheitsphilosophie hat dazu geführt, dass für Tunnelbauwerke, die heute ein Alter von etwa acht und mehr Jahren aufweisen, enormes Nachrüstungspotenzial besteht. Im Bundeshaushalt sind bis zum Ende des Jahres 2015 insgesamt 960 Mio € für die sicherheitstechnische Nachrüstung von Straßentunneln eingeplant, um diese gemäß den Anforderungen der RABT 2006 auszustatten.

Wie in Abschnitt 2.5 gezeigt wurde, nimmt die öffentliche Hand durch die Publikation von Richtlinien und Verordnungen innerhalb bestimmter Grenzen Einfluss auf die planerische Gestaltung von Tunnelbauwerken und auf die Konzeptionierung der Betriebsphase. Vielfach beschränken sich die Hinweise auf pauschale Empfehlungen, die nicht mehr als die Spiegelung bisher gemachter Erfahrungen mit dem Betrieb von Straßentunneln darstellen. In der Regel werden lediglich isolierte Betrachtungen angestellt und Variantenentscheidungen ohne die Berücksichtigung von Wechselwirkungen getroffen. So geht aus der Bevorzugung einer bestimmten technischen Komponente gegenüber einer anderen nicht hervor, ob beispielsweise neben einer Energieeinsparung auch aus der zu erwartenden theoretischen Nutzungsdauer ein Vorteil oder möglicherweise sogar ein Nachteil hervorgeht. Der Aspekt der Reinvestition in technische Bauteile oder betriebstechnische Komponenten hat bisher wenig Beachtung erfahren. Außer in der im Abschnitt 2.5.7 vorgestellten „Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung“ existiert für den Tunnelbau und -betrieb kein Regelwerk, das Nutzungsdauern für Betriebsausstattungen in Tunnelbauwerken vorgibt. Hieraus lässt sich der Schluss ziehen, dass der Aufbau einer entsprechenden Datenbank als sehr sinnvoll anzusehen ist.

Es lässt sich schlussfolgern, dass die jährlich wiederkehrenden Betriebskosten für Straßentunnel sehr wohl abgeschätzt und im Etat des Bundesverkehrsministeriums berücksichtigt werden können. Im Gegensatz dazu ist es aber schwierig, die auf den Bund zukommenden hohen Aufwendungen für die Instandhaltung der Straßentunnel über einen zeitlichen Horizont von 20 bis 30 Jahren abzuschätzen. Ein geeigneter Ansatz, der die Ermittlung entsprechender Gelder im Rahmen einer Etataufstellung ermöglicht, erfordert die Abkehr von der Kameralistik auf Bundesebene. Vergleichbar zum in Abbildung 7 gezeigten Vorgehen sind für einzelne Tunnelbauwerke die Brutto- bzw. Netto-Vermögenswerte zu ermitteln sowie die resultierenden Modernitätsgrade zu bestimmen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen implizieren einen Hinweis auf die sich abzeichnenden Instandhaltungsaufwendungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird indes ein anderer Lösungsweg beschritten: Es wird ein Berechnungsmodell entwickelt, welches die gesamte Lebensdauer eines Tunnelbauwerks überspannt und dem Anwender eine auf monetären Ansätzen basierende Analyse ermöglicht. Hierzu müssen Lebenszykluskostenmodelle, die sich im Hochbau und in Ansätzen auch im Brückenbau etabliert haben, an die Charakteristika der Tunnelplanung und des -betriebs angepasst werden. Dazu ist es aber zunächst erforderlich, das Konzept der lebenszykluskostenbasierenden Philosophie für Bauwerke zu erläutern. Im Nachgang werden dann die konzeptionellen Grundzüge auf die Erfordernisse bei Tunnelbauwerken angepasst.

Im Rahmen von Expertengesprächen mit Vertretern der öffentlichen Hand und von in ÖPP-Projekten involvierten Baukonzernen wurde der Notwendigkeit eines solchen Modells eindeutig zugestimmt. Insbesondere bei der monetären Bewertung technischer Detailfragen zum Tunnelbetrieb liegen bisher sehr wenige Erfahrungen und belastbare Untersuchungen vor. Aber gerade dieses Wissen hat für einen privaten Anbieter einen hohen Stellenwert, denn die Kalkulation für ein ÖPP-Projekt deckt eine Zeitspanne von mindestens 30 Jahren ab. Folglich umfasst die Kalkulation von ÖPP-Projekten Planung, Bau und einen bedeutenden Anteil der Betriebsphase. Grundlage eines Vertragsschlusses zwischen der öffentlichen Hand und dem privaten Partner ist aber ein Zeitpunkt, der den Stand der Entwurfsplanung (vgl. HOAI-Phase 3 [39]) widerspiegelt.

3 Der Lebenszyklusgedanke – vom Ursprung bis zur Anwendung in der Bauwirtschaft

3.1 Begriffsbestimmung

In der Lehre der Biologie wird der Lebenszyklus als die Beschreibung der Entwicklungsstadien eines Lebewesens verstanden. Charakteristisch für alle Lebewesen ist, dass sie geboren werden, wachsen, sich fortpflanzen, altern und schließlich sterben. Der Begriff des Lebenszyklus (engl. life-cycle) zur Abbildung der Lebensphasen von Produkten oder Bauwerken hat sich in der deutschsprachigen und internationalen Fachliteratur innerhalb der letzten Jahrzehnte etabliert. Auch wenn die Nutzung des Lebenszyklusbegriffes für Objekte gelegentlich auf Kritik stößt, findet dieser – und darin sind alle weiteren sprachlichen Facetten des Lebenszyklus inbegriffen – in dieser Arbeit Verwendung.

3.2 Ausgangsbasis Produktlebenszyklus

Im Sinne der Betriebswirtschaftslehre umfasst der Lebenszyklus eines marktfähigen Erzeugnisses neben der Produktentwicklung sämtliche Prozesse, die von der gezielten Produktplatzierung bis zum Abzug des Produktes vom Markt reichen. Wie beispielsweise Fabrycky und Blanchard [67] und Hofmann [98] zeigen, durchlaufen Produkte kennzeichnende Entwicklungsstufen, die mit typischen Absatzentwicklungen einhergehen. Dabei wird verschiedenen Faktoren, genannt seien Konkurrenzbeziehungen, Verhaltensstrategien der Anbieter oder auch der technische Fortschritt, eine hohe Relevanz beigemessen. Diese Rahmenbedingungen beeinflussen einen produktspezifischen Absatzverlauf, der nach Hoffmann [98] in einem Produktlebenszyklusmodell abgebildet werden kann. Der Produktlebenszyklus umfasst die folgenden sechs charakteristischen Phasen:

- Phase 1 – Entwicklung: Es besteht die Absicht, ein neues Produkt zu entwickeln. Die Forschungs- und Entwicklungsphase zeichnet sich durch Investitionen aus, denen keine Erlöse gegenüberstehen. Aus dieser Phase gehen ein serienreifer Prototyp sowie eine Strategie zur Vermarktung des Produktes hervor.
- Phase 2 – Einführung: Mit Beginn der Serienproduktion erfolgt die Einführung der Ware am Markt; aufgrund eines limitierten Bekanntheitsgrades wird sie jedoch erst von wenigen Käufern erworben.
- Phase 3 – Wachstum: Infolge steigender Akzeptanz seitens der Konsumenten unterliegt das Erzeugnis einem Wachstumsprozess.
- Phase 4 – Reife: Das Produkt gelangt zur Reife, wenn die Nachfrage sinkt und der Wachstumsprozess zum Erliegen kommt.
- Phase 5 – Sättigung: Während der Sättigungsphase nimmt die Anzahl der Produktabnehmer ab; die Akzeptanz des Produktes infolge von Konkurrenz oder schwindender Attraktivität lässt nach.
- Phase 6 – Rückgang: Das baldige Ausscheiden des Produktes vom Markt kündigt sich aufgrund einer sehr geringen Nachfrage an. Sobald das Erzeugnis nicht mehr verfügbar ist, endet der Produktlebenszyklus.

Die sechs Phasen lassen sich unter Einbeziehung monetärer Beurteilungsgrößen anhand eines Beispiels weiter präzisieren: Aus der Perspektive eines Herstellers, der mehrere Produktserien von Tunnelleuchten anbietet, soll eine neue Serie auf den Markt gebracht werden, die die neueste Generation von LEDs beinhaltet. Aus der Entwicklungsphase geht nach einiger Zeit ein technisch ausgereiftes Produkt hervor, so dass die Serienproduktion nach Beschaffung von Herstellungsmaterialien beginnen kann. Entwicklungs- und Produktionsprozesse zeichnen sich durch Kosten aus, die zum Beispiel durch den Einsatz des Personals, von Produktionsmaschinen oder durch die Verwendung von Bauteilen verursacht werden. Mit dem Start der Produktion entstehen Güter, die Ausdruck der Leistungserbringung bzw. des eigentlichen Betriebszwecks sind. Erlöse hingegen werden erst ab dem Zeitpunkt generiert, zu dem LED-Leuchten durch Käufer erworben

werden. Absatzschwankungen oder -rückgänge können den Hersteller dazu veranlassen, den Abzug des Produktes vom Markt vorzubereiten, etwaige Produktverbesserungen vorzunehmen oder in Neuentwicklungen zu investieren.

Abbildung 11 zeigt qualitativ die zuvor anhand eines Beispiels erläuterten Zusammenhänge. Die sechs zuvor definierten Phasen des Produktlebenszyklus sind im unteren Teil der Abbildung als Zeitstrahl aufgetragen. Das obere Diagramm in Abbildung 11 stellt Erlöse und Kosten pro Abrechnungszeitraum dar – beispielsweise innerhalb eines Quartals oder eines Jahres. Das untere Diagramm beinhaltet die Kumulation der zuvor in Balkenform dargestellten Erlöse und Kosten. Die Differenz aus Leistung und Kosten führt im oberen Diagramm zur Darstellung der Deckungsbeitragskurve, im unteren Diagramm zur Ableitung der Ergebnisentwicklung.

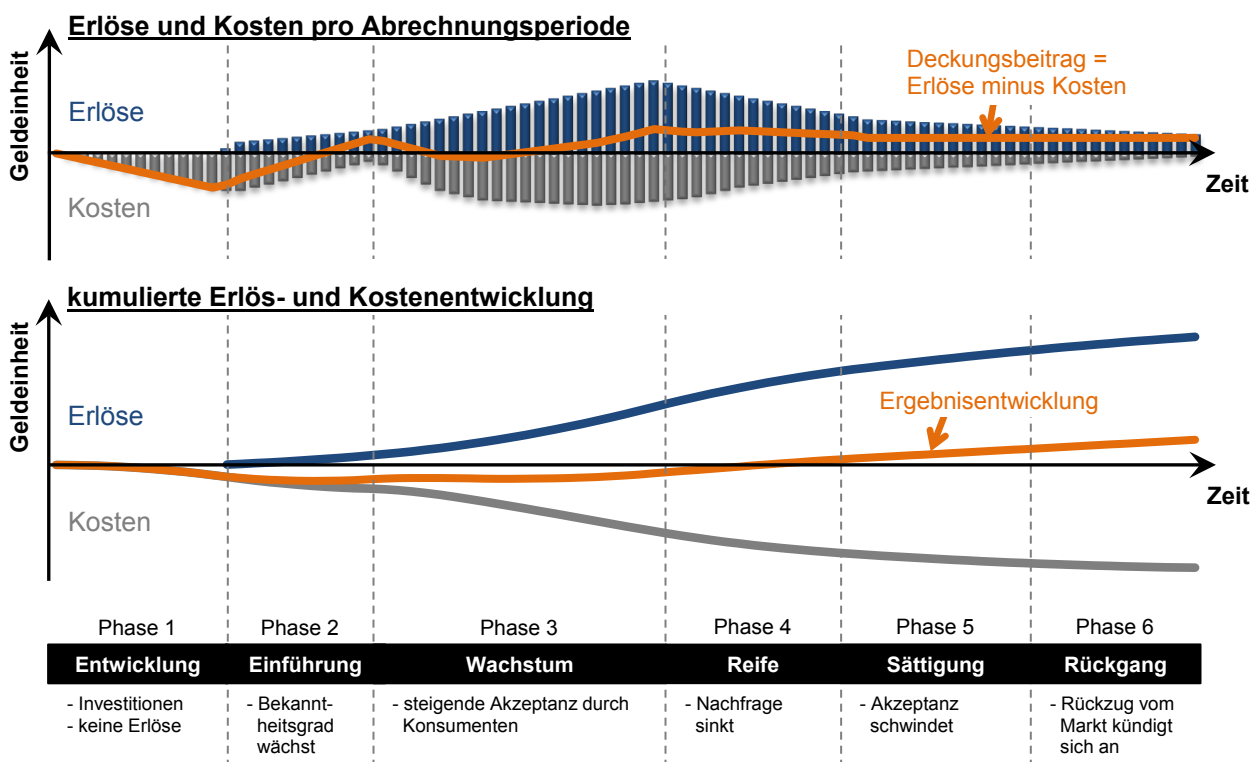


Abbildung 11: Kosten- und Erlöse über die Dauer des Produktlebenszyklus

Als ein wesentliches Kennzeichen des Produktlebenszyklus ist hervorzuheben, dass Kosten und Erlöse wechselseitig in Interaktion zueinander stehen. Kündigt sich eine Abschwächung der Kundenakzeptanz an, so ist das Produktionsvolumen anzupassen, anderenfalls droht ein Überangebot und es besteht die Gefahr negativer Auswirkungen auf die Ergebnisentwicklung. Nach Hoffmann [98] ist der Produktlebenszyklus dazu geeignet, „Gesetzmäßigkeiten im Ablauf des Marktprozesses zu erfassen und Verhaltenstheorien aufzustellen sowie auf der Grundlage einer gesetzmäßigen Absatzentwicklung Prognoseverbesserungen zu ermöglichen und absatzpolitische Entscheidungshilfen zu geben“. Weiter wird in [98] ausgeführt, dass sich grundsätzlich zwei Modelltypen aus dem Konzept des Produktlebenszyklus ableiten lassen. Das Erklärungsmodell erlaubt die Interpretation beobachteter Werte, beim Prognosemodell wird aufgrund einer Datenhistorie eine Extrapolation mutmaßlicher zukünftiger Entwicklung vorgenommen. Die Übertragung des Konzeptes auf Bauwerke macht, wie im folgenden Abschnitt 3.3 gezeigt wird, eine kombinatorische Nutzung beider Modellansätze erforderlich.

3.3 Anpassung an die bauwirtschaftlichen Rahmenbedingungen

3.3.1 Der Unikatcharakter eines Bauwerks

Bei einem Bauwerk handelt es sich nicht, sieht man von der Fertighaus-Modulbauweise oder von standardisierten Betonfertigteilen ab, um ein Serien- oder Massenprodukt, sondern vielmehr um eine Einzelfertigung, die an die Spezifikationen des Auftraggebers und an die umfeldbezogenen, beispielsweise geologischen, klimatologischen oder infrastrukturellen Gegebenheiten anzupassen ist. Auf die Anfertigung eines Prototyps wird in der Regel verzichtet, allenfalls können einzelne Einflussgrößen, etwa die Tragfähigkeit des Baugrundes durch Pfahlprobelastungen, ermittelt werden. Maßgeblichen Einfluss auf die Machbarkeit eines Projektes haben die gegenwärtig anerkannten Regeln der Technik oder eventuell der darüber hinausgehende, in der Regel noch nicht in Normen oder Richtlinien erfasste Stand der Technik. Zusammenfassend bedeutet dies, dass für eine Bauaufgabe einerseits alternative Problemlösungen existieren, andererseits infolge voranschreitender technischer Entwicklung andersartige Bauausführungen ermöglicht werden. Ein Bauwerk ist somit auch immer ein Spiegelbild des Zeitpunkts, zu dem es geplant und errichtet wurde.

Der Bau einer Bundesfernstraße besitzt beispielsweise eine besondere Tragweite, so dass nach deutschem Planungsrecht das Planfeststellungsverfahren zur Anwendung kommt. Dabei wird die gesamte Projektplanung einer verbindlichen behördlichen Feststellung unterzogen. Mit Abschluss des Planfeststellungsverfahrens erlässt die Genehmigungsbehörde einen Feststellungsbeschluss, der Detailänderungen enthält oder Abstimmungen mit Dritten vorschreibt.

Abbildung 12 fasst die Einflüsse zusammen, die im Zuge der Planung eines Bauwerks zu beachten und mit Ingenieurverstand umzusetzen sind. Am Ende des Planungs- und Bauprozesses erhält der Auftraggeber ein Bauwerk, das den vielfältigen Vorgaben Rechnung trägt und ein einmaliges Ergebnis der Bauproduktion widerspiegelt.

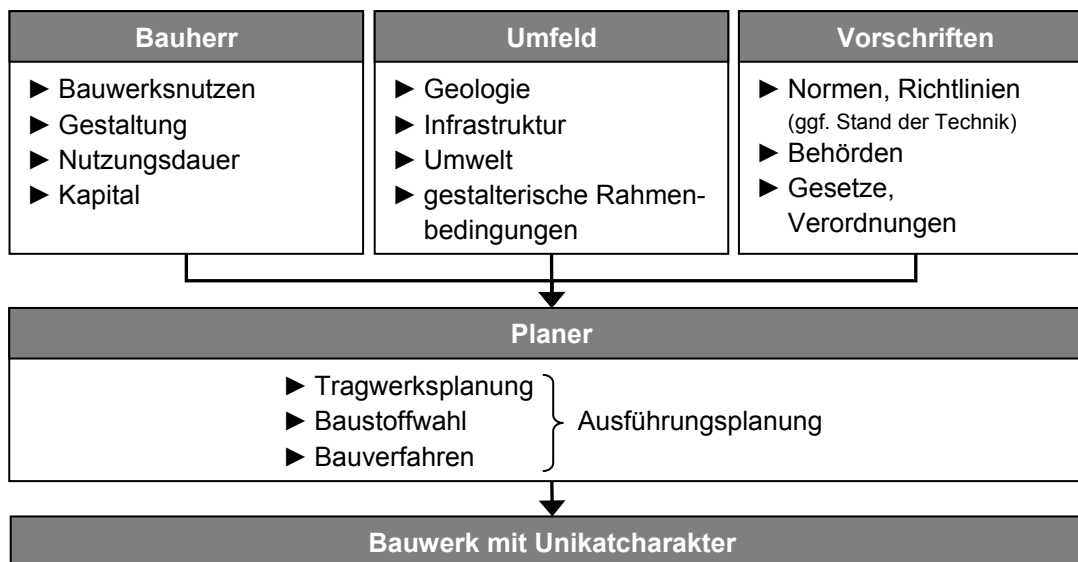


Abbildung 12: Einflüsse, die ein Bauwerk zu einem Unikat machen

Während der Rohbau aus Baustoffen wie Beton, Stahl oder Mauerwerk besteht, sind Ausstattungskomponenten, wie beispielsweise Beleuchtungs- und Belüftungssysteme, Türanlagen, Bauteilbeschichtungen oder elektronische Mess- und Regeltechnik aus Edelstahl, Kunststoff, Holz, Glas oder elektrischen Bauteilen gefertigt. Jede dieser Komponenten weist eine spezifische Nutzungsdauer auf, die möglicherweise deutlich von der sehr langen Nutzungsdauer des Rohbaus abweicht. Neben turnusmäßigen Wartungs- und Inspektionsarbeiten werden in Zeitintervallen in der Größenordnung mehrerer Jahrzehnte für alle Bauteile und Kompo-

nenen Instandhaltungsmaßnahmen notwendig. Hierbei stellt sich heraus, ob Bauteile instandzusetzen oder auszutauschen sind, Einzelkomponenten weiter betrieben werden können oder ob ganze Komponentengruppen durch neue Produkte ersetzt werden müssen. An dieser Stelle wird die Analogie zum Produktlebenszyklus ersichtlich, sodass zunächst die Notwendigkeit besteht, eine Anpassung an die Rahmenbedingungen der Bauwirtschaft vorzunehmen.

3.3.2 Der Bauwerkslebenszyklus

Im Gegensatz zum Produktlebenszyklus, der den Absatz genau eines Produktes in willkürlicher Stückzahl betrachtet, verläuft der Bauwerkslebenszyklus aufgrund der Unikatcharakteristik für jedes Bauwerk unterschiedlich. Um jedoch ein funktionsfähiges und die Erwartungen des Bauherrn erfüllendes Bauwerk zu planen und zu errichten, ist das Zusammenspiel vieler Baustoffe und Bauteile erforderlich. Müller und Vogel [128] verweisen darauf, dass bei der Abschätzung der Lebensdauer eines komplexen Bauwerks Wechselwirkungen zwischen einzelnen Bauteilen bestehen und die Bedeutung der Bauteile im Kontext mit dem Gesamtsystem erfasst werden müssen. Auch Haardt [92] bestätigt diese Vorgehensweise und merkt an, dass auf diesem Gebiet weiterer Forschungs- und Erklärungsbedarf besteht.

Indem zunächst ein Gesamtzeitraum für die Nutzung eines Bauwerks vom Bauherrn oder einem Betreiber festgelegt wird, ist implizit auch eine Entscheidung zu allen Baustoffen und Bauteilen gefallen, nämlich, dass sie über die gewählte Periodendauer ihre Funktionstüchtigkeit erfüllen müssen. Dieser Forderung ist allerdings nur dann nachzukommen, wenn das Bauwerk instand gehalten wird, d.h. Baustoffe und Bauteile benötigen Pflege, Wartung und Reparatur.

Die Tragwerksstruktur eines Bauwerks kann für die folgenden Untersuchungen hinreichend genau mit dem Begriff „Rohbau“ gleichgesetzt werden. In der Regel ist der Rohbau das Bauteil, welches die längste Nutzungsdauer aufweist. Unter der Voraussetzung, dass das Bauwerk korrekt geplant wurde, haben neben der planmäßigen Belastung durch Nutzung auch äußere Einflüsse wie extreme Niederschläge, Temperaturwechsel oder UV-Strahlung gewöhnlich keine negativen Auswirkungen auf die Gesamtlebensdauer. Demzufolge kann bereits aufgrund der strukturellen Robustheit eines Bauwerks eine erste Festlegung zur antizipierten Gesamtnutzungsdauer erfolgen. Für einige Hoch- und Ingenieurbauwerke sind in Tabelle 8 Größenordnungen für durchschnittliche Nutzungsdauern bei ordnungsgemäßer Instandhaltung – also ohne Berücksichtigung von grundhaften Modernisierungsmaßnahmen – angegeben.

Bauwerksart	Nutzungsdauer [Jahre]
Einfamilienhaus, freistehend ¹⁾	60 bis 100
Fertighaus in Massiv-, Fachwerk- und Tafelbauweise ¹⁾	60 bis 80
Verwaltungsgebäude ¹⁾	50 bis 80
Parkhaus, Tiefgarage ¹⁾	50
Industriegebäude, Werkstätten, Lagergebäude ¹⁾	40 bis 60
<u>Brückenunterbau</u> ²⁾	
aus Mauerwerk, Beton, Stahlbeton	110
aus Stahl	100
<u>Brückenoberbau</u> ²⁾	
aus Stahlbeton, Spannbeton	70
aus Stahl	100
Tunnel, Bergmännische Bauweise ²⁾	130
Tunnel, Offene Bauweise ²⁾	90

¹⁾ nach Wertermittlungsrichtlinie 2006, Anlage 4 [25]

²⁾ nach Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung [32]

Tabelle 8: Zusammenstellung von Bauwerksnutzungsdauern

Ist die Nutzungsdauer für ein Bauwerk festgelegt worden, so müssen sich alle weiteren Bauwerksausstattungen dieser Mindestanforderung unterordnen. Auch aus einer anderen Perspektive betrachtet, ist diese Vorgehensweise schlüssig: Wird der Rohbau gemäß der oben eingeführten Festlegung als ein singuläres Bauwerkselement angesehen, so ist davon auszugehen, dass die Position „Rohbauerstellung“ höhere Investitionskosten als die Addition aller übrigen Ausbaupositionen erfordert. Wird der Rohbau rückgebaut, so erfordert dies die Deinstallation aller weiteren im Bauwerk verarbeiteten Bauteile. Werden hingegen „nur“ einzelne Bauteile ausgetauscht, bleibt die Rohbaustruktur weiter funktionstüchtig und in den überwiegenden Fällen vom Bauteilaustausch unbeeinflusst.

Während beim Produktlebenszyklus eine Periodendauer nicht vorausschauend bestimmt werden kann, ist bei Bauwerken die anfängliche Festlegung einer Gesamtnutzungsdauer zwingend erforderlich. Erst im nächsten Schritt stehen Überlegungen dazu im Vordergrund, wie diese zeitliche Zielvorgabe erreicht werden kann. Einerseits muss der Rohbau die erforderliche Robustheit aufweisen, andererseits müssen Bauwerksausstattungen aus ökonomischer Blickrichtung derart gewählt werden, dass sich ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Investitions- und Betriebs- bzw. Unterhaltungskosten ergibt. Wird, wie zuvor erläutert, beim Rohbau davon ausgegangen, dass dieser während der Nutzungsdauer zwar instand gesetzt, aber nicht ersetzt bzw. umfangreich saniert wird, so wird im Gegensatz dazu der überwiegende Teil der Ausstattungselemente im Laufe des Bauwerkslebenszyklus mindestens einmal, in vielen Fällen auch häufiger ausgetauscht. Darüber hinaus erfahren Ausstattungselemente technische Weiterentwicklungen. Ausdruck solcher Weiterentwicklungen können beispielsweise eine veränderte Bauart, eine Erhöhung des energetischen Effizienzgrades oder eine modifizierte Leistungsfähigkeit sein. Als Beispiel sei der Ersatz einer Einfachverglasung durch eine Doppel- oder Dreifachverglasung genannt, die dazu beiträgt, die Energie- und Schallschutzeffizienz zu verbessern. Der technischen Modifikation eines spezifischen Bauteils wohnt somit der Grundgedanke des Produktlebenszyklus inne: Im Zuge eines Bauwerkslebens durchlaufen einzelne Bauteile, wie bei Vogt und Thewes [166] ausgeführt, mehrere Produktlebenszyklen. Auf der anderen Seite beinhaltet der Lebenszyklus eines Bauteils implizit auch immer die Gefahr, dass benötigte Bauteile nicht mehr am Markt verfügbar sind oder der garantierte Zeitraum zum Bezug von Ersatzteilen bereits abgelaufen ist. Insbesondere bei der rechnergestützten Betriebstechnik muss zudem in Betracht gezogen werden, dass die Kompatibilität zwischen vorhandenen und neuesten Komponenten nicht mehr gegeben ist und zwangsläufig der Austausch ganzer Systeme notwendig wird.

Zusammenfassend stellt Abbildung 13 das Zusammenspiel von Bauteilen über die Gesamtnutzungsdauer eines Bauwerks anschaulich dar. Stellvertretend für eine Vielzahl von Bauteilen sind neben dem Bauteil „Rohbau“ exemplarisch die Bauteile „A“ und „B“ aufgeführt.

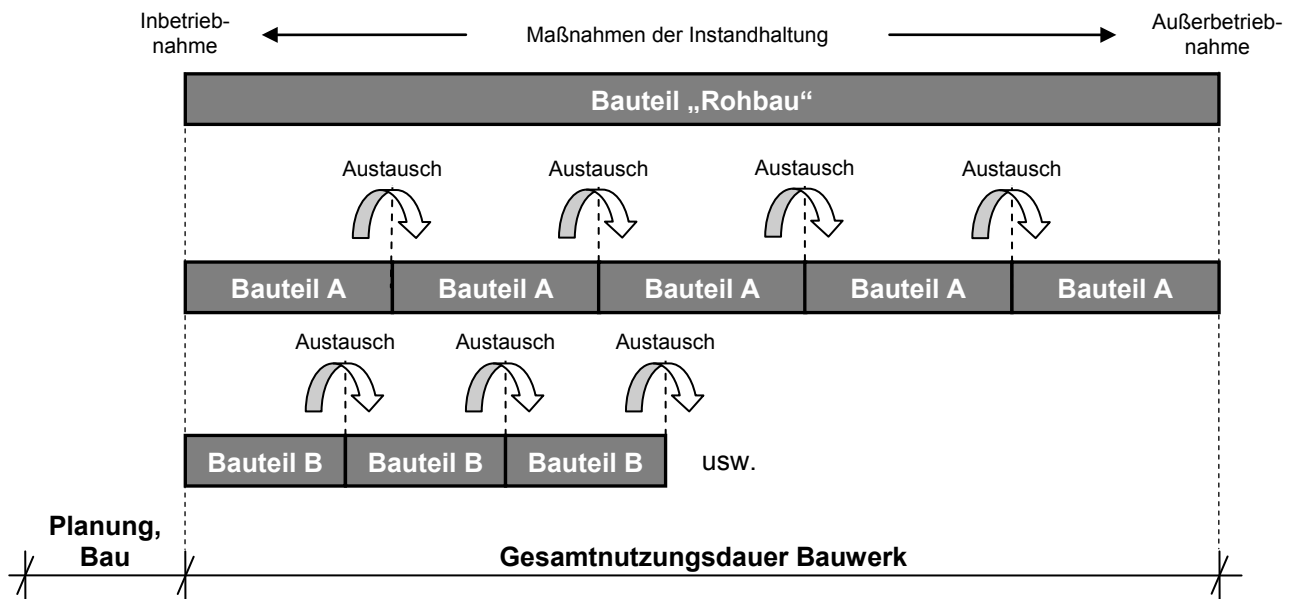


Abbildung 13: Abgrenzung zwischen Rohbau- und Bauteilnutzungsdauer

Eine feststehende Begriffsbestimmung zum Lebenszyklus von Bauwerken existiert, wie beispielweise Rudloff und Schwarz [143] ausführen, bisher nicht. Vielmehr legen nationale und internationale Normen und Regelwerke den Lebenszyklusbegriff unterschiedlich aus. Während das Ende des Lebenszyklus in der Regel mit der Außerbetriebnahme oder Beseitigung erreicht wird, ist der Beginn des Lebenszyklus nicht einheitlich festgelegt.

Nach ISO/FDIS 15686-5 [104] besteht der Lebenszyklus aus allen Phasen, die von der baulichen Errichtung, dem Betrieb und der Instandhaltung bis zum Ende der Gebrauchstauglichkeit reichen. Für ein zu betrachtendes Objekt sind die genannten Phasen aufeinanderfolgend und miteinander verzahnt. Die amerikanische Norm ASTM E 917-05 [3] bezeichnet den Lebenszyklus von Bauwerken oder eines damit verbundenen baulichen Systems als eine Periode, die je nach Perspektive des Betrachters Planung, Erwerb, Bau- und Betrieb, Instandhaltung, Ersatz und Verwertung einschließt. Aus zeitlicher Sicht umfassender, jedoch ohne explizite Beschränkung auf Bauwerke, formuliert die in Australien und Neuseeland gültige Norm AS/NZS 4536:1999 [4] den Lebenszyklusbegriff: Dieser beginnt demnach bereits zu dem Zeitpunkt, zu dem die Notwendigkeit oder Vorteilhaftigkeit eines Objektes erkannt wird und endet mit der Entsorgung. Unter maßgeblicher Mitarbeit der German Facility Management Association, kurz GEFMA, ist das Konzept vom Produktlebenszyklus auf die Planung, Realisierung sowie Bewirtschaftung von Bauwerken übertragen worden. Gemäß der Richtlinie GEFMA 100-1 [78] ist der Lebenszyklus eine „sich wiederholende Abfolge zeitlicher Abschnitte in der Entstehung, Nutzung und Verwertung“ von Objekten.

Die beschriebenen, für den Bausektor spezifischen Charakteristiken machen es erforderlich, analog zum Vorgehen beim Produktlebenszyklus, kennzeichnende Phasen zu definieren. Unabhängig von der Art des Bauwerks und den herrschenden Randbedingungen lassen sich vier Phasen identifizieren:

- Phase A – Planung: Vom Bauherrn werden Funktion und Nutzungsdauer des Bauwerks bestimmt, sowie die aufeinander aufbauenden Planungsstufen durchlaufen. Der Planer spezifiziert die erforderlichen Leistungen und holt Angebote von Bietern ein. Die Vergabe der Bauleistung repräsentiert das Ende der Planungsphase.
- Phase B – Bau: Das Bauwerk inklusive aller Nebengewerke wird gemäß der in Phase A aufgestellten Ausführungsplanung realisiert. Hohe Investitionskosten sind ein Hauptkennzeichen dieser Phase. Mit der Abnahme und Inbetriebnahme des Bauwerks durch den Bauherrn endet der Bauprozess.

- Phase C – Betrieb und Unterhaltung: Der Betrieb des Bauwerks verzehrt Aufwendungen für Energie, Inspektion und Wartung. Zu diesen regelmäßig und pro Zeiteinheit in etwa gleichbleibender Höhe anfallenden Kosten kommen in unregelmäßigen Abständen Aufwendungen für größere Instandhaltungsmaßnahmen hinzu (Sanierung, Bauteilaustausch, ggf. Umnutzung). Handelt es sich um ein Renditeobjekt, so stehen den Kosten Erlöse aus Mieteinnahmen oder Nutzungsgebühren gegenüber.
- Phase D – Verwertung: Mit der Außerbetriebnahme des Bauwerks beginnt die Verwertungsphase. Mögliche Szenarien sind der Rückbau, die Umnutzung oder der Verkauf des Bauwerks.

Es sei explizit darauf hingewiesen, dass die Verwertungsphase mit in die Lebenszyklusbetrachtung einzubeziehen ist. Aus ihr können – insbesondere aus wirtschaftlicher Sicht – weitreichende Folgen resultieren. Infolge einer Außerbetriebnahme können Überwachungsmaßnahmen erforderlich werden, wie zum Beispiel der Schutz des Bauwerks vor Vandalismus oder die Einhaltung behördlicher Umweltschutzaufgaben. Besonders deutlich werden diese Forderungen durch die Außerbetriebnahme oder den Rückbau von Atomkraftwerken. Ist der Rückbau eines Bauwerks geplant, so sind bestenfalls bereits in der Planungsphase entsprechende Abbruchverfahren, wie sie zum Beispiel bei Osebold [130] aufgezeigt werden, zu berücksichtigen. Aus der Umnutzung oder dem Verkauf eines Bauwerks kann sich schließlich ein neuer Lebenszyklus oder die Fortführung des mutmaßlich gerade zu Ende gehenden Lebenszyklus entwickeln.

Soll der Lebenszyklusgedanke für Bauwerke zur Anwendung kommen, so sind grundsätzlich zwei praxisnahe Szenarien denkbar: Bei der Neuplanung und anschließenden Errichtung kommen alle Phasen A bis D zum Tragen. Handelt es sich hingegen um ein Bestandsbauwerk, so erfolgt die Betrachtung ab einem Zeitpunkt, der innerhalb der Phase C angesiedelt ist. Es wird ersichtlich, dass das Potential, welches einer lebenszyklusorientierten Betrachtungsweise innewohnt, mit zunehmender Nutzungsdauer abnimmt. In der Planungsphase werden bereits die wichtigsten Entscheidungen getroffen, so dass Effizienzpotentiale während der Betriebs- und Unterhaltungsphase aufgrund der herrschenden baulichen Randbedingungen nur noch in geringerem Umfang genutzt werden können. Anders ausgedrückt, sind Fehler, die in der Planungsphase eines Bauwerks aufgrund von Unwissenheit oder fehlender Notwendigkeit begangen worden sind, nur beschränkt oder unter unverhältnismäßigen Anstrengungen rückgängig zu machen. Aus diesen Vorüberlegungen gehen die folgenden zwei, in Abbildung 14 dargestellten Szenarien hervor.

- Szenario 1 – Neubau: Ein Betrachter befindet sich am Anfang des Zeitstrahls, genau zu Beginn der Phase A. Aus dieser Perspektive werden nacheinander alle Phasen untersucht und die entsprechenden Einflüsse identifiziert. Es handelt sich um ein rein prognostisches, also auf Berechnungen oder anderweitig gesammelte Erfahrungen beruhendes Modell.
- Szenario 2 – Bestandsbauwerk: Das Bauwerk hat bereits einen Teil der Betriebsphase durchschritten. Ein Betrachter nimmt einen Standpunkt ein, der sich innerhalb der Phase C befindet. Der vorgefundene Zustand des Bauwerks ist die Grundlage dafür, über sofortige und zukünftige Instandhaltungsmaßnahmen zu entscheiden. Auch kann es aufgrund der zu analysierenden Betriebshistorie erforderlich werden, das Bauwerk grundhaft zu sanieren oder an die Vorgaben aktueller Regelwerke anzupassen. Es handelt sich beim zweiten Szenario um ein retrospektiv-prognostisches Modell, da bauwerksspezifische Erfahrungswerte dazu herangezogen werden, den weiteren Werdegang des Bauwerks vorherzusagen.

Das zuvor aufgezeigte Lebenszyklus-Potential und die damit verbundene Möglichkeit, Effizienzvorteile frühzeitig auszuschöpfen, ist im unteren Teil der Abbildung 14 qualitativ dargestellt.

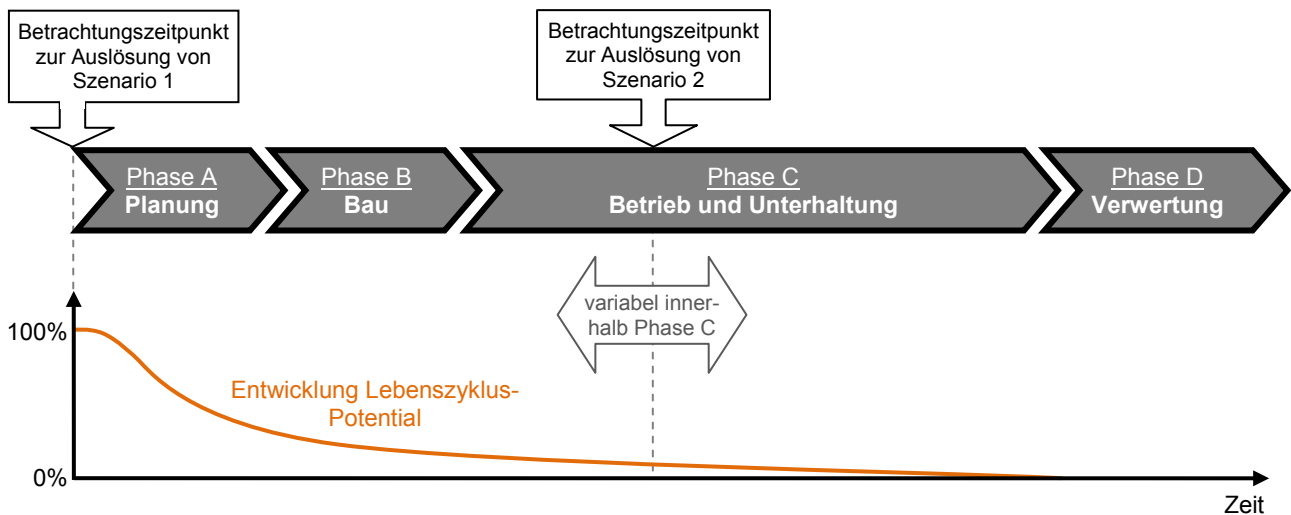


Abbildung 14: Das Lebenszyklus-Potential in Abhängigkeit vom Betrachtungszeitpunkt

In Abhängigkeit von den in Abbildung 14 eingetragenen Betrachtungszeitpunkten zur Auslösung eines Szenarios herrschen unterschiedliche Rahmenbedingungen vor. Diese Rahmenbedingungen sollen im Folgenden als kausale Abhängigkeiten bezeichnet und für die Szenarien 1 und 2 näher betrachtet werden. Die kausalen Abhängigkeiten vermitteln einen Eindruck, welche langfristigen Auswirkungen mit einer Entscheidungsfindung verbunden sind. Es sei an dieser Stelle bereits darauf hingewiesen, dass die aus den Kausalitäten hervorgehenden Konsequenzen – diese können monetärer Art sein, die Lebensdauer von Bauteilen oder Fragen der Instandhaltung betreffen – in den Abschnitten 3.4 und 3.5 behandelt werden.

Das „Design-bid-build“ oder das „Design-build“ Verfahren ist nach der in der Baubranche herrschenden Diktion als die klassische Projektabwicklungsform bekannt und rückt die Bauausführung in den Vordergrund der Betrachtungen. Im Gegensatz dazu verspricht sich der Bauherr mit der Anwendung der lebenszyklusorientierten Planung (vgl. Szenario 1) Effizienzgewinne für die Betriebs- und Unterhaltungsphase. Das Kriterium für die Vergabe eines Auftrags erfolgt also nicht nur anhand der Baukosten, sondern es muss die Betriebs- und ggf. die Verwertungsphase mit einbeziehen. Hieraus erwächst die Forderung, dass ein Planer in der Lage sein muss, alternative Ausführungsvarianten vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit, der Dauerhaftigkeit und, wenn erforderlich, unter dem ökologischen Nachhaltigkeitsaspekt zu bewerten.

Abbildung 15 führt kausale Abhängigkeiten zwischen den Lebenszyklusphasen auf, die aus der Perspektive eines Bauherrn bzw. seines Planers zwingend zu beachten sind. Einschränkend sei darauf hingewiesen, dass das Prognosemodell nach Szenario 1 nur dann anwendbar ist, wenn die Funktionalität und der Ausstattungsstandard des Bauwerks vorgegeben werden und Planungsvarianten zu denselben erzielbaren Erlösen führen. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, so erfolgt in Einklang mit Abbildung 15 die Analyse der unter dem Stichwort „Planung“ vertikal gegliederten Aspekte: Konkret betrifft dies die Bauart, die konstruktive Durchbildung sowie die Bauwerksausstattung. Auf horizontaler Ebene ergeben sich für die drei genannten Aspekte weitere Kausalitäten. Bei eingehender Betrachtung zeigt sich schließlich, dass nicht nur eine horizontale, sondern teilweise auch eine vertikale Vernetzung der Kausalitäten erforderlich wird. Durch entsprechende Pfeilverbindungen in Abbildung 15 werden diese hergestellt. Die hohe Anzahl der Verbindungen macht deutlich, dass ein lebenszyklusbasierender Variantenvergleich ohne ein rechnergestütztes Bewertungsmodell nahezu unmöglich ist. Schub und Stark [147] betonen, dass das Durchdringen und Analysieren von solchen Netzstrukturen einen außerordentlich hohen Einfluss auf eine gute Vorplanung hat. Weiter führen sie aus, dass ein Versäumnis notwendiger Entscheidungen in der Vorplanung dazu führt, diese Defizite später nur noch unkontrollierbar nachzuholen.

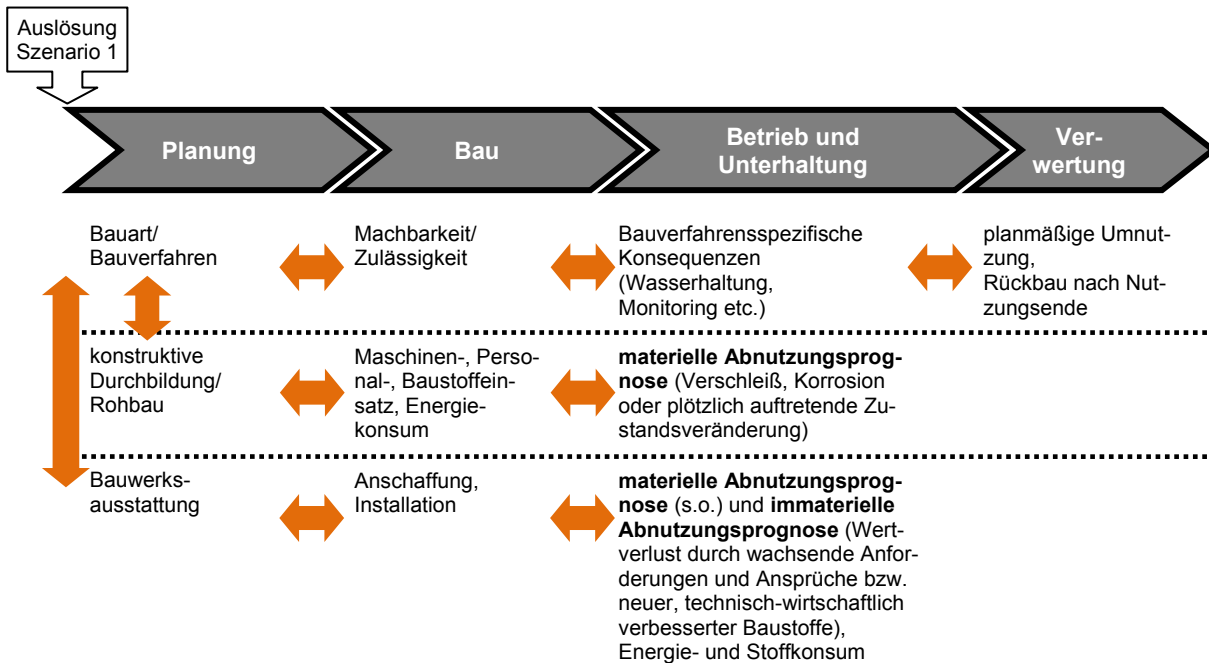


Abbildung 15: Verknüpfung von Kausalitäten bei der Lebenszyklusplanung von Bauwerken (Szenario 1)

Insbesondere die unter dem Stichwort „Betrieb und Unterhaltung“ aufgeführten Kausalitäten der materiellen und immateriellen Abnutzungsprognose bedürfen weiterer Erklärungen. Die materielle Abnutzung beschreibt das planmäßige Aufzehren der funktionserfüllenden Eigenschaften eines Bauteils bzw. eines Baustoffs. Hierunter wird beispielsweise Ermüdung unter dynamischer Beanspruchung, Korrosion oder Degradation unter Witterungseinflüssen verstanden. Die einzelnen identifizierten Einflüsse sind isoliert oder in Kombination miteinander zu betrachten und bei der Planung eines Bauwerks für eine Vielzahl von Baustoffen zu berücksichtigen (vgl. Stangenberg [149]). Wie Müller und Vogel [127] exemplarisch für den Baustoff Beton zeigen, ist ein Baustoff definierten, standortabhängigen und bauwerksspezifischen Einwirkungen ausgesetzt, denen charakteristische Widerstände entgegenstehen. Solange das Widerstandspotential mindestens den Einwirkungen entspricht oder Grenzwerte nicht unterschritten werden, droht kein Versagen. Unter Implementierung von Schädigungs-Zeit-Gesetzen kann der auf probabilistischen Verfahren beruhende Zeitpunkt einer Schädigung theoretisch bestimmt werden. Hieraus lassen sich Abschätzungen von Lebensdauern für die betreffenden Bauteile ableiten. Beim zweiten Faktor, der immateriellen Abnutzungsprognose, handelt es sich um einen weiteren Wertverlust, der sich einerseits dadurch ausdrückt, dass an einen Baustoff bzw. ein Bauteil mit der Zeit veränderte, in der Regel erhöhte Anforderungen und Ansprüche gestellt werden. Andererseits entwickeln sich Baustoffe und Bauteile technisch und wirtschaftlich weiter, so dass dieser Einfluss noch zusätzlich die immaterielle Abnutzung erhöhen kann.

Nimmt der Betrachter einen Standpunkt innerhalb der Betriebs- und Unterhaltungsphase ein, so kommt das zweite Szenario zur Anwendung. Aufgrund der in der Vergangenheit bereits erfolgten Nutzung des Bauwerks müssen für die einzelnen Baustoffe und Bauteile entsprechende Zustandsbewertungen vorgenommen werden. Im Sinne der DIN 31051 [55] ist die Nutzung „eine bestimmungsgemäße Verwendung nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik, wobei die bei der Planung veranschlagten Belastungen nicht überschritten werden“. Die Bestimmung der Auswirkung bisheriger Bauwerksnutzung erfolgt nach DIN 31051 durch eine Inspektion. Hierbei werden „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Istzustandes einer Betrachtungseinheit einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung“ ergriffen. Je nach Ergebnis der Inspektion wird das Bauteil instand gesetzt oder verbessert. Der Begriff der Instandsetzung nach DIN 31051 [55] sieht

„Maßnahmen zur Rückführung einer Betrachtungseinheit in den funktionsfähigen Zustand“ vor. Ist eine Instandsetzung unwirtschaftlich oder nicht zielführend, wird eine Verbesserung notwendig. Dabei handelt es sich um eine „Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements zur Steigerung der Funktionssicherheit einer Betrachtungseinheit, ohne die von ihr geforderte Funktion zu ändern“. Bestenfalls kann der Bauwerksbetreiber seine Entscheidungen, die in die Zukunft gerichtet sind, auf dokumentierte Erfahrungen aus der Vergangenheit beziehen; daher handelt es sich um ein retrospektiv-prognostisches Modell.

Auch im Fall von Szenario 2 wird in Verbindung mit Abbildung 16 ersichtlich, dass kausale Verknüpfungen zu einer komplexen Abhängigkeitsstruktur führen. Die Forderung nach einem Analysemodell, welches die Lebenszyklusplanung ermöglicht, muss daher auch an dieser Stelle erneut bekräftigt werden. Zuletzt soll noch auf den Sonderfall verwiesen werden, dass Instandsetzungen und/oder Verbesserungen zu einem nicht wirtschaftlichen Gesamtergebnis führen. Für diesen Fall können der Rückbau und der Beginn eines neuen Lebenszyklus vorteilhaft sein. Als Grundlage einer Neuplanung ist dann das Szenario 1 heranzuziehen.

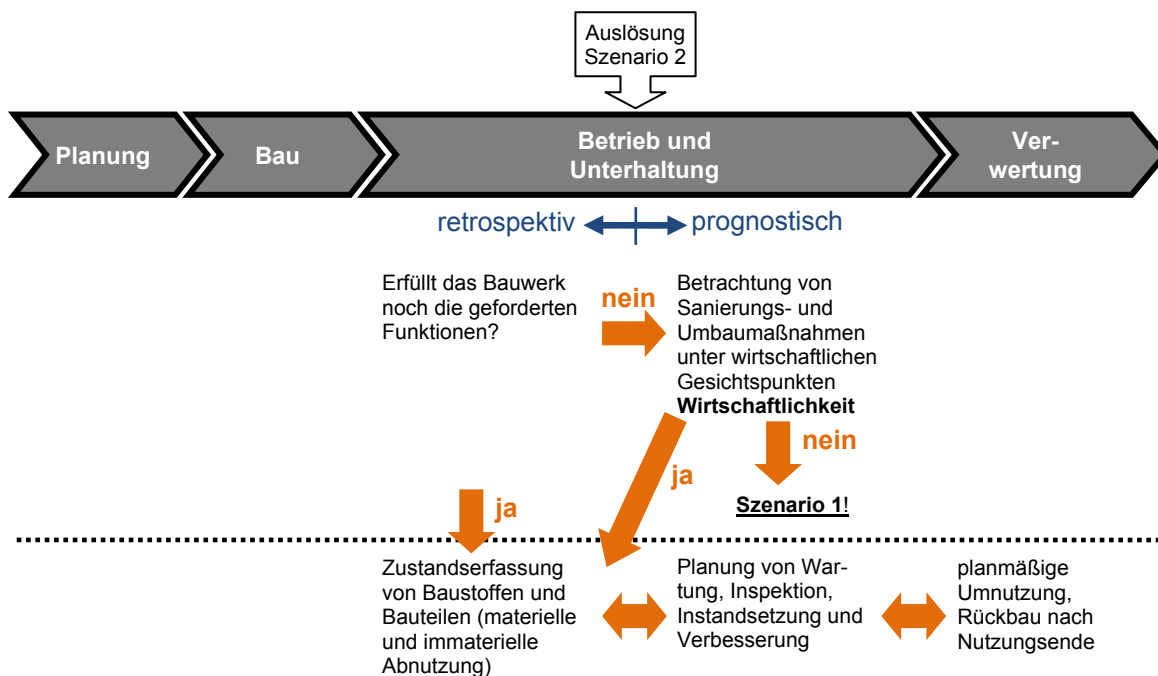


Abbildung 16: Verknüpfung von Kausalitäten bei der Lebenszyklusplanung von Bauwerken (Szenario 2)

Wie gezeigt wurde, sind Angaben zu Bauteillebensdauern sowie die Planung und Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen integrale Bestandteile des Lebenszykluskonzeptes von Bauwerken. Die entsprechenden Grundlagen für eine fundierte Festlegung von Annahmen sind dazu im Folgenden noch weiter zu vertiefen. Des Weiteren wurde als Gradmesser für eine zu treffende Investitionsentscheidung die Wirtschaftlichkeit herangezogen. Auch diesbezüglich, gemeint sind Kostenart und -umfang, besteht weiterer Erläuterungsbedarf. Auf dem Weg zur Erarbeitung eines Lebenszyklusmodells sollen die genannten Aspekte in den nachfolgenden Abschnitten 3.4 und 3.5 einer detaillierten Betrachtung unterzogen werden.

3.4 Das Abnutzungsverhalten von Baustoffen und Bauteilen

3.4.1 Normative Grundlagen

Die zuvor häufig in Kombination genannten Begriffe Baustoff und Bauteil werden in Einklang mit der DIN 31051 [55] als Betrachtungseinheiten bezeichnet. Kennzeichen einer Betrachtungseinheit ist, dass einzelne

Teile, Bauelemente, Geräte, Teilsysteme oder Funktionseinheiten isoliert und unabhängig voneinander aufgefasst werden. Zur Erstellung eines Bauwerks werden beispielsweise Hauptbaustoffe wie Beton, Mauerwerk oder Baustahl benötigt; diese werden auf der Baustelle verarbeitet und sind anschließend Bestandteil des Rohbaus. Bauteile hingegen stellen eine Kombination aus mehreren Werkstoffen dar und werden meist nach einem örtlichen Aufmaß stationär vorgefertigt, auf die Baustelle geliefert und als Ausstattungselemente in das Bauwerk integriert. Beispiele hierfür sind Lüftungsanlagen, Fassadenelemente oder Beleuchtungseinheiten.

Jede Betrachtungseinheit ist unterschiedlich intensiven Abnutzungsprozessen ausgesetzt. Dieser Prozess wird als der Abbau des Abnutzungsvorrats bezeichnet und nach DIN 31051 durch chemische und/oder physikalische Vorgänge hervorgerufen. Als die „Gesamtheit aller im Laufe der Zeit in einem Material irreversibel ablaufenden chemischen und physikalischen Vorgängen“ ist nach DIN 50035-1 [56] die Alterung definiert und somit vom Sinn her gleichbedeutend mit der materiellen Abnutzung. Beide Begriffe werden im Weiteren parallel verwendet, jedoch ist die Alterung begrifflich enger mit der eigentlichen Wortherkunft der Lebenszyklusphilosophie verwoben. Die Alterung ist ein durch standortabhängige Einflüsse hervorgerufener, natürlicher und kontinuierlicher Prozess, der nahezu immer herrscht und nicht vermeidbar ist. Abbildung 17 führt unter Bezugnahme auf Klingenberg [110] Faktoren auf, die auf den Alterungsfortschritt einer Betrachtungseinheit einwirken. Neben der Wahl des Werkstoffs, der rechnerischen Dimensionierung und der dauerhaften oder kurzzeitigen Exposition spielen Nutzungsintensität und Instandhaltungsmaßnahmen eine maßgebliche Rolle.

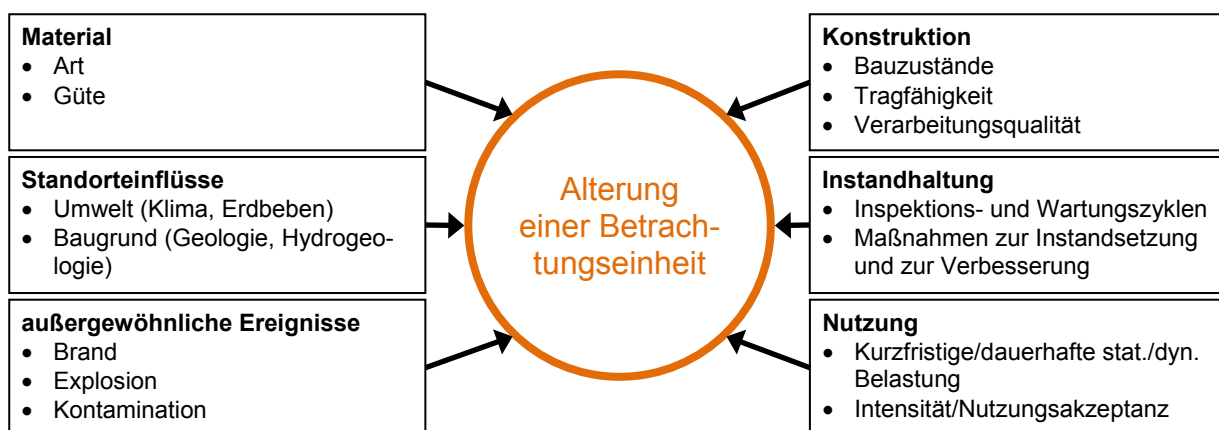


Abbildung 17: Einflüsse auf das materielle Abnutzungsverhalten, nach [110]

Für einzelne Baustoffe und Bauteile lässt sich der Alterungsverlauf – und die somit zu erwartende Lebensdauer – in entsprechenden Alterungskurven darstellen. Die Verläufe werden für unterschiedliche Betrachtungseinheiten nach dem gleichen Prinzip konstruiert, jede einzelne Kurve weist jedoch ein abschnittsweises, spezifisches Steigungsverhalten auf. Eine Alterungskurve beschreibt die Fortschreitung der Abnutzung und stellt innerhalb der Gesamtnutzungszeit den noch vorhandenen Abnutzungsvorrat dar. Dieser ist definiert als der „Vorrat der möglichen Funktionserfüllungen unter festgelegten Bedingungen, der einer Betrachtungseinheit innewohnt“. Nach Installation eines Baustoffs bzw. Bauteils ist der Abnutzungsvorrat in noch vollem Umfang vorhanden und weist einen Wert von 100 % auf. Mit voranschreitender Nutzung nimmt der Abnutzungsvorrat ab. In Abhängigkeit von den Einwirkungen, die Abnutzungserscheinungen hervorrufen, aber auch vor dem Hintergrund, dass eine Betrachtungseinheit möglicherweise sicherheitsrelevante Funktionen mit einer hohen Zuverlässigkeit erfüllen muss, ist für jede Betrachtungseinheit eine spezifische Abnutzungsgrenze festzulegen. Nach DIN 31051 ist die Abnutzungsgrenze „der vereinbarte oder festgelegte Mindestwert des Abnutzungsvorrates“. Das Erreichen der Abnutzungsgrenze ist gleichbedeutend mit dem Zeitpunkt, zu dem die zugewiesene Funktion gerade nicht mehr erfüllt werden kann.

Die Gesamtheit aller in Abbildung 17 aufgeführten Einflüsse lässt darauf schließen, dass der Abbau des Abnutzungsvorrates grundsätzlich verschiedene Verläufe annehmen kann. Drei charakteristische Verläufe von Alterungskurven sind in Abbildung 18 in Anlehnung an Klingenberg [110] wiedergegeben:

- Verlaufstyp 1: geringer Abbau des Abnutzungsvorrats über einen langen Zeitraum, schneller Abbau des Abnutzungsvorrats gegen Ende der Gesamtnutzungsdauer,
- Verlaufstyp 2: stetiger, aber mit zunehmender Nutzungsdauer steigender Abbau des Abnutzungsvorrats,
- Verlaufstyp 3: starker Abbau des Abnutzungsvorrats in der frühen und späten Phase der Nutzung, in der Zwischenzeit deutlich geringerer Abbau.

Werden für Bauteile identischer Bauart kategorisch die Zeitpunkte dokumentiert, zu denen die Abnutzungsgrenze erreicht ist, so ist eine starke Streuung der Werte zu erwarten. Fallen nach Krug [115] Bauelemente infolge von Materialfehlern oder wegen besonderer Beanspruchungen bereits sehr bald nach Beginn der Nutzung aus, so handelt es sich um einen Frühausfall. Werden Funktionseinheiten wegen nicht vorhersehbarer, außergewöhnlicher Einwirkungen funktions- oder gebrauchsunfähig, so werden diese als Zufallsausfälle eingestuft. In allen übrigen Fällen – dies sind die oben beschriebenen Verlaufstypen 1 bis 3 – wird das Funktionsversagen als Verschleiß- und Ermüdungsausfälle bezeichnet.

Beispielhafte Kurvenverläufe für Früh-, Zufalls- und Verschleißausfälle sind in Abbildung 18 dargestellt. Die wiedergegebenen Kurven führen dazu, dass Betrachtungseinheiten zu ganz unterschiedlichen Zeitpunkten von einer in die nächste Zustandskategorie übergehen.

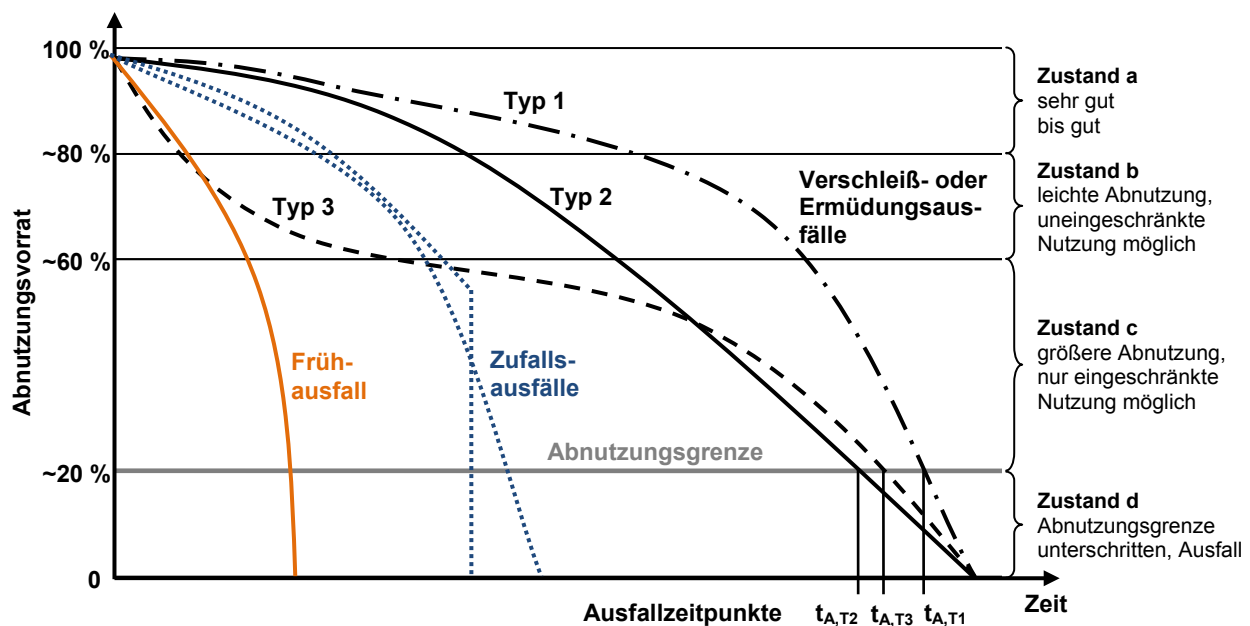


Abbildung 18: Prinzipien des materiellen Abnutzungsverhaltens, nach [110]

Das Abnutzungsverhalten einer Betrachtungseinheit wird wesentlich durch die Instandhaltung beeinflusst. Nach Auslegung der DIN 31051 [55] kann die Instandhaltung, wie in Abbildung 19 gezeigt, in die Grundmaßnahmen Wartung, Inspektion, Instandsetzung und Verbesserung untergliedert werden. Im Laufe des Lebenszyklus eines Bauwerks sind unter dem Oberbegriff der Instandhaltung technische und administrative Maßnahmen gebündelt, die einen funktionsfähigen Zustand sicherstellen sollen. Um eine Interpretation der in Abbildung 19 aufgeführten, teilweise sehr abstrakten Normtexte zu ermöglichen, sind im unteren Teil der Abbildung Beispiele angegeben. Die Beispiele präzisieren die einzelnen Instandhaltungsmaßnahmen für Bauwerke und gehen auf Ausführungen von Kalusche [107] und Gänßmantel et al. [77] zurück.

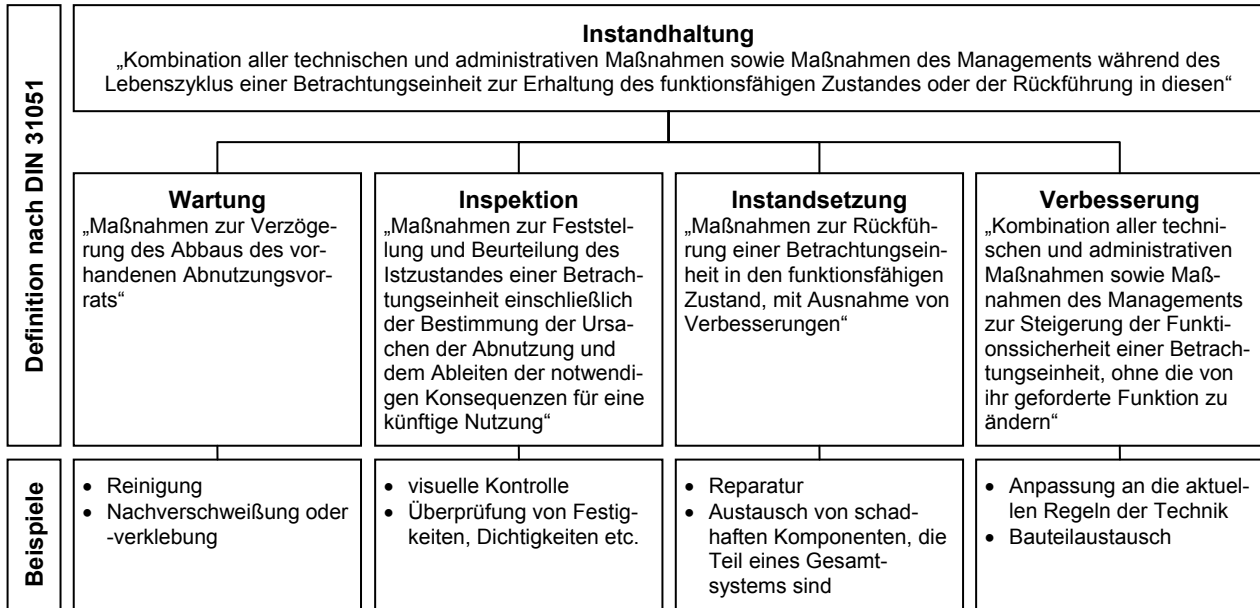


Abbildung 19: Untergliederung der Instandhaltung, nach [55], [107], [77]

Instandhaltungen können nach unterschiedlichen Strategien erfolgen. Detaillierte Ausführungen enthält DIN EN 13306 [61], die die Instandhaltung in präventive und korrektive Maßnahmen unterteilt. Die präventive Instandhaltung kommt in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien mit dem Ziel zur Anwendung, die Ausfallwahrscheinlichkeit zu verringern. Die korrektive Instandhaltung wird ausgeführt, sobald ein Fehler erkannt wird. Infolgedessen wird die Betrachtungseinheit derart instand gesetzt, dass eine zukünftige Funktionserfüllung auch weiter möglich ist.

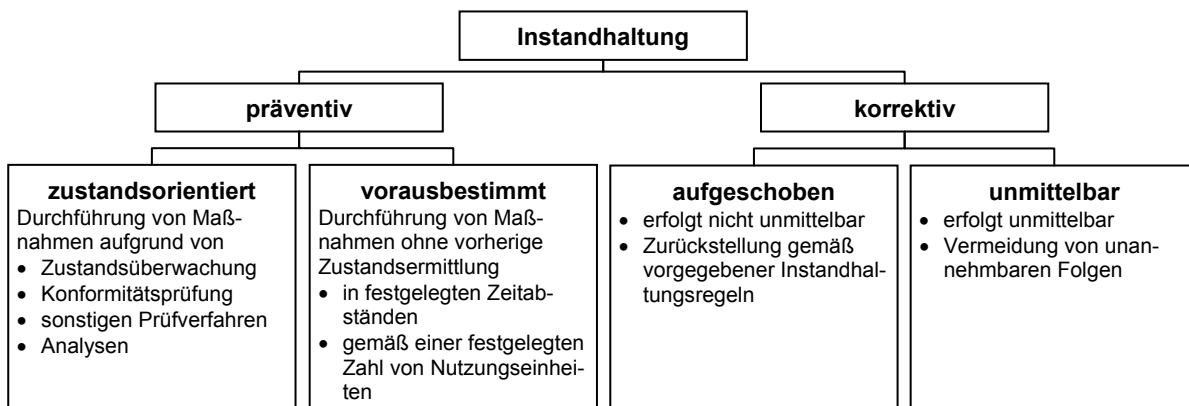


Abbildung 20: Untergliederung der Instandhaltung, nach DIN EN 13306 [61]

Nach [77] ist das oberste Ziel der Instandhaltung, den Soll-Zustand einer Betrachtungseinheit beizubehalten und Ist-Zustände des Alterungsprozesses zu dokumentieren. Vor Erreichen der Abnutzungsgrenze sind Instandhaltungsmaßnahmen zu ergreifen, die den Soll-Zustand wiederherstellen oder ggf. sogar übertreffen. Dies kann dadurch erreicht werden, dass eine zwischenzeitlich erfolgte technische Weiterentwicklung bessere Materialien hervorgebracht hat als jene Materialien, die bis zum (Beinahe-)Ausfall eingesetzt wurden.

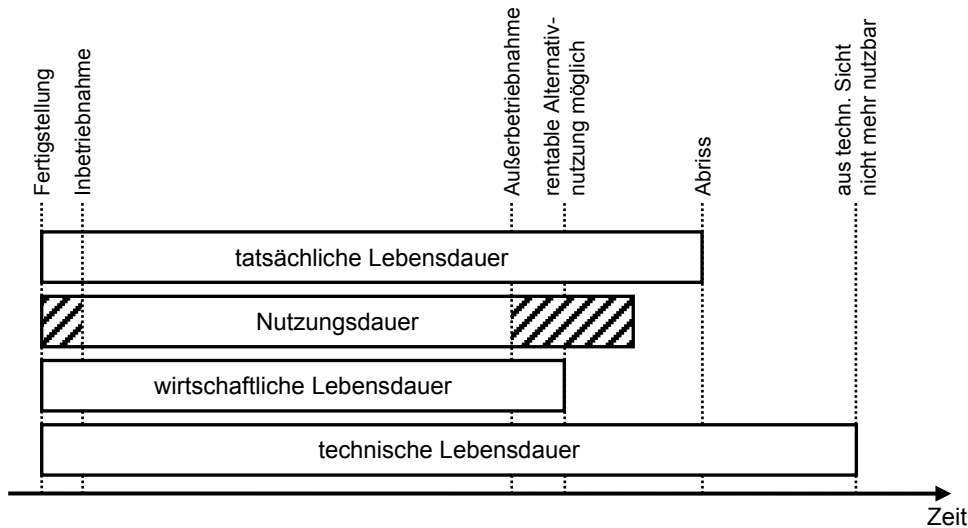
Theoretisch ist es denkbar, dass auch ein unverhältnismäßig großer Instandhaltungsaufwand betrieben werden kann, um die technische Funktionsfähigkeit einer Betrachtungseinheit zu erhalten. Um dieses zu vermeiden, wird die technische von der wirtschaftlichen Lebensdauer abgrenzt.

3.4.2 Abgrenzung der wirtschaftlichen von der technischen Lebensdauer

Der Zeitraum, in dem die technisch einwandfreie Nutzung einer Anlage möglich ist, wird nach Wöhe und Döring [171] in der betriebswirtschaftlichen Lehre als die technische Lebensdauer bezeichnet. In vielen Fällen ist es, wie in [171] weiter ausgeführt, „die technische Lebensdauer durch ständige Instandhaltungsmaßnahmen und den Ersatz ganzer Bauteile beliebig zu verlängern“. Jedoch wird im Leben einer Anlage schließlich der Zeitpunkt erreicht, ab dem sich Reparaturen unter ökonomischen Gesichtspunkten nicht mehr lohnen. Vielmehr ist es wirtschaftlich sinnvoll, vor Ablauf der technischen Lebensdauer die bestehende Anlage im Zuge einer Ersatzinvestition durch eine neue Anlage zu ersetzen. Die Definition dieses Zeitpunkts geht nicht mehr auf technische Aspekte zurück und wird als wirtschaftliche Nutzungs- oder Lebensdauer bezeichnet. Jedoch ist mit dieser Erkenntnis die Frage verbunden, welcher Lebensdauervariante vor dem Hintergrund einer betriebswirtschaftlichen Zielsetzung der größte Nutzen innewohnt. Ein Gradmesser zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit einer Variante ist die Höhe des Kapitalwertes. Wöhe und Döring [171] definieren den Kapitalwert als den Betrag, „um den man im Falle einer vorteilhaften Investition reicher und im Falle einer unvorteilhaften Investition ärmer wird“. Die wirtschaftliche Lebensdauer kann also aus der Perspektive eines Investors als die optimale Nutzungsdauer angesehen werden. Sie geht in jener Periode zu Ende, in welcher der Kapitalwert ein Maximum aufweist. In der Praxis lässt sich der Zeitpunkt, zu dem dieses Optimum erreicht wird, nicht eindeutig im Voraus berechnen. Vielmehr kann die wirtschaftliche Lebensdauer im Sinne eines Näherungswertes angegeben werden. Anhaltspunkte zur Prognose von wirtschaftlichen Lebensdauern gehen nach Wöhe und Döring [171] aus betriebsindividuellen Erfahrungen oder aus AfA-Tabellen (AfA = Absetzung für Abnutzung) hervor.

Übertragen auf die Merkmale im Bauwesen ist die wirtschaftliche Lebensdauer nach Bahr und Lennerts [6] der Zeitraum, in dem es unter den gegebenen Bedingungen ökonomisch sinnvoll ist, ein Bauteil als Bestandteil eines Bauwerks zu nutzen. Das Ende der wirtschaftlichen Lebensdauer ist erreicht, wenn aufgrund von hohen Kosten für Instandhaltungen die Kosten für das Bauteil die Erträge übertreffen oder wenn alternative Nutzungen unter Berücksichtigung aller Kosten eine höhere Rendite erwirtschaften. Die wirtschaftliche Lebensdauer eines Gebäudes hängt sowohl von den Nutzungsmöglichkeiten als auch von den Abhängigkeiten der Bauteile untereinander und den Nutzungsansprüchen ab. Je besser ein Gebäude, ein Bauteil bzw. eine Anlage sich an wechselnde Anforderungen anpassen lassen, desto positiver wirkt sich dies auf die wirtschaftliche Lebensdauer aus.

Die wirtschaftliche Lebensdauer ist in der Regel kürzer als die technische Lebensdauer. Nach Bahr und Lennerts [6] stellt die technische Lebensdauer eine Obergrenze für die Haltbarkeit von Bauteilen dar und ist erreicht, wenn ein Bauteil die ihm zugeordnete Funktion nicht mehr erfüllen kann, Instandhaltungsmaßnahmen technisch nicht mehr möglich sind und das Bauteil ausgetauscht werden muss. Über den gesamten Bauwerkslebenszyklus betrachtet existieren mehrere signifikante Zeitpunkte, die Anfang und Ende der wirtschaftlichen und der technischen Lebensdauer des Gesamtbauwerks markieren. Erfolgt der Abriss, so endet die tatsächliche Lebensdauer. Die Nutzungsdauer hingegen repräsentiert den Zeitraum, in dem das Bauwerk seine bestimmungsgemäße Funktion durch Benutzung erfüllt. In Anlehnung an Rottke und Wernecke [142] lassen sich über die Dauer des Bauwerkslebenszyklus Lebens- und Nutzungsdauerbegriffe, wie in Abbildung 21 dargestellt, miteinander verknüpfen.



Hinweis: Die schraffierten Flächen stehen für möglicherweise längere oder kürzere Nutzungsdauern, beispielsweise auch über den Horizont der Nutzungsdauer hinaus.

Abbildung 21: Lebens- und Nutzungsdauern im Bauwerkslebenszyklus, nach [142]

Schub und Stark [147] merken an, dass das Problem der Lebensdauer in der Praxis häufig einfacher gesehen wird. Die wirtschaftliche Lebensdauer wird dadurch bestimmt, „dass ein Bauprojekt solange als ökonomisch angesehen wird, als seine Nutzung wirtschaftlich ist, d.h. solange die Erträge den Aufwand mindestens noch ausgleichen“.

Unabhängig von den an früherer Stelle in Tabelle 8 angegebenen Bauwerksnutzungsdauern existieren Tabellenwerke, die Lebensdauern von Bauteilen und Baustoffen beinhalten. Der überwiegende Anteil dieser Datensammlungen nimmt Bezug auf Bauteile, die im Hochbau zur Anwendung kommen. Jedoch besteht bezüglich der Benennung von Lebensdauern bisher keine einheitliche Terminologie. Wie Bahr und Lennerts [6] ausführen, existieren überwiegend keine standardisierten Referenzlebensdauern, die für einen Vergleich untereinander herangezogen werden können. Die in einschlägiger Literatur verfügbaren Angaben stammen beispielweise aus praktischen Erfahrungen, Experimenten oder Herstellerangaben und wurden unter schwer vergleichbaren Rahmenbedingungen gewonnen. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick zu den unterschiedlichen, in der Fachliteratur aufzufindenden Begrifflichkeiten zu Bauteillebensdauern gegeben. Abschließend wird sprachlich und inhaltlich definiert, welche Lebensdauer ausdrücke in dieser Arbeit zur Anwendung kommen sollen.

3.4.3 Lebensdauerbegriffe in der Literatur und Einführung der theoretischen Nutzungsdauer

Es existieren mehrere Begrifflichkeiten, die Lebens- und Nutzungsdauern von Tragwerken, Bauwerks- und Anlagenteilen ausdrücken. Die Angaben zu technischen Lebensdauern basieren zumeist auf der statistischen Auswertung realer Beobachtungswerte. Tabellierte Aufstellungen zu Lebensdauern von Baustoffen und Bauteilen können z.B. den Veröffentlichungen von Arlt und Pfeiffer [2], Ritter [141] und Agethen et al. [1] entnommen werden.

Unter der Berücksichtigung von Inspektion, Wartung und Instandsetzung kann die technische Lebensdauer, wie im Abschnitt 3.4.1 erläutert, erheblich variieren. Dass in der Vergangenheit erfolgte Maßnahmen zur Verlängerung der technischen Lebensdauer eines Bauteils möglicherweise nicht wirtschaftlich waren, wird in der Regel erst dann offensichtlich, wenn das Bauteil dennoch früher als prognostiziert irreparabel versagt und ausgetauscht werden muss. Aus den in der Literatur aufgeführten Lebensdauern geht in der Regel nicht hervor, welchen Umfang an Instandsetzungsmaßnahmen ein betrachtetes Bauteil bis zum Zeitpunkt des Versagens erfahren hat und ob die beobachtete Lebensdauer einer tatsächlichen wirtschaftlichen Prüfung

standhält. Folglich existieren in der Fachliteratur keine feststehenden Definitionen für Lebens- oder Nutzungsdauern. Ein Überblick zu den in Regelwerken verwandten Begrifflichkeiten ist im Folgenden aufgeführt.

Nach Auslegung der DIN EN 1990 „Grundlagen der Tragwerksplanung“ [58] ist die geplante Nutzungsdauer die „angenommene Zeitdauer, innerhalb der ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass jedoch eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist“. Als Größe für die geplante Nutzungsdauer ist für monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke eine Größenordnung von 100 Jahren anzunehmen.

Im Sinne der DIN 31051 „Grundlage der Instandhaltung“ [55] ist die Verfügbarkeit die „Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls in einem Zustand zu sein, dass sie eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen unter der Annahme erfüllen kann, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind“.

Der Verein Deutscher Ingenieure (VDI) hat die Richtlinie 2884 „Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing“ [160] herausgegeben. Anwender dieser Richtlinie sind überwiegend Hersteller und Betreiber von Maschinen und industriellen Anlagen. Ein Kriterium, das den Vergleich alternativ angebotener Produktionsmittel beeinflusst, ist die geplante Nutzungsdauer. Zahlreiche Faktoren wie Markt- und Absatzprognosen, technologische Weiterentwicklungen oder strategische Entscheidungen üben Einfluss auf die Nutzungsdauer aus. Die Richtlinie empfiehlt, „alle relevanten Entscheidungsträger eines Unternehmens in die Abschätzung der geplanten Nutzungsdauer einzubeziehen“.

Nach Auffassung der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) [118] ist die durchschnittliche Nutzungsdauer wasserbaulicher Anlagen zu dem Zeitpunkt erreicht, ab dem die anfallenden Kosten den noch erzielbaren Nutzen zu übersteigen beginnen. Da dieser Zeitpunkt in der Vorausschau nur sehr schwer abzuschätzen ist, wird in der Praxis die durchschnittliche Nutzungsdauer vergleichbarer Anlagen herangezogen. In der Publikation der LAWA sind durchschnittliche Nutzungsdauern aufgeführt, beispielweise 50 bis 80 Jahre für Kanäle in geschlossener Bauweise, 30 bis 40 Jahre für Becken einer Kläranlage oder 80 bis 100 Jahre für Hochwasserdämme.

Nach dem Verständnis der in Abschnitt 2.5.7 erläuterten Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV) [32] beginnt die theoretische Nutzungsdauer von Bauwerksteilen und Bauteilen eines Infrastrukturbauwerks mit dem Jahr der verkehrsbereiten Fertigstellung. Die theoretische Nutzungsdauer spiegelt dabei den Erfahrungswert für die mögliche Nutzungsdauer einer baulichen Anlage, eines Bauwerksteils oder eines Bauteils wider.

Im Folgenden soll die Terminologie der ABBV übernommen und die Lebensdauer einer Betrachtungseinheit anhand der theoretischen Nutzungsdauer ausgedrückt werden. Der dieser Arbeit zugrundeliegende Begriff der theoretischen Nutzungsdauer für Rohbauten, Bauteile und Baustoffe zeichnet sich durch die folgenden Charakteristiken aus:

- für alle separaten Betrachtungseinheiten eines Bauwerks finden in regelmäßigen Abständen Wartungs- und Inspektionsarbeiten statt,
- Frühausfälle bleiben ohne Konsequenzen für den Bauwerkseigentümer bzw. -betreiber, da davon ausgegangen wird, dass ein derartiger Ausfall im Rahmen der Garantie- und Gewährleistungsphase auftritt. Für die Regulierung eines Schadens werden der Produkthersteller oder der Unternehmer, der das Bauteil verarbeitet und installiert hat, herangezogen. Nach Durchführung geeigneter korrekativer Maßnahmen (Instandsetzung, Austausch) erreicht der Abnutzungsvorrat wieder einen Wert von annähernd 100%,
- bei Zufallsausfällen ist eine Instandsetzung oder eine Verbesserung aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll. Der Abnutzungsvorrat erreicht nach einer Instandsetzung einen Wert von etwa 100 %, im Falle einer Verbesserungsmaßnahme kann er infolge einer zwischenzeitlich erfolgten technischen Weiterentwicklung den Wert von 100 % überschreiten,

- Bauteile und Baustoffe, die einen „planmäßigen“ Abbau des Nutzungsvorrates aufweisen und infolge Ermüdung oder Verschleiß die Abnutzungsgrenze erreichen, werden als irreparabel eingestuft und müssen durch eine neue Betrachtungseinheit ausgetauscht werden.

Die zuvor beschriebenen Szenarien, die zu einer Eingrenzung der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten theoretischen Nutzungsdauer führen, sind anhand der Entwicklung des Abnutzungsvorrats einer Betrachtungseinheit in Abbildung 22 grafisch dargestellt.

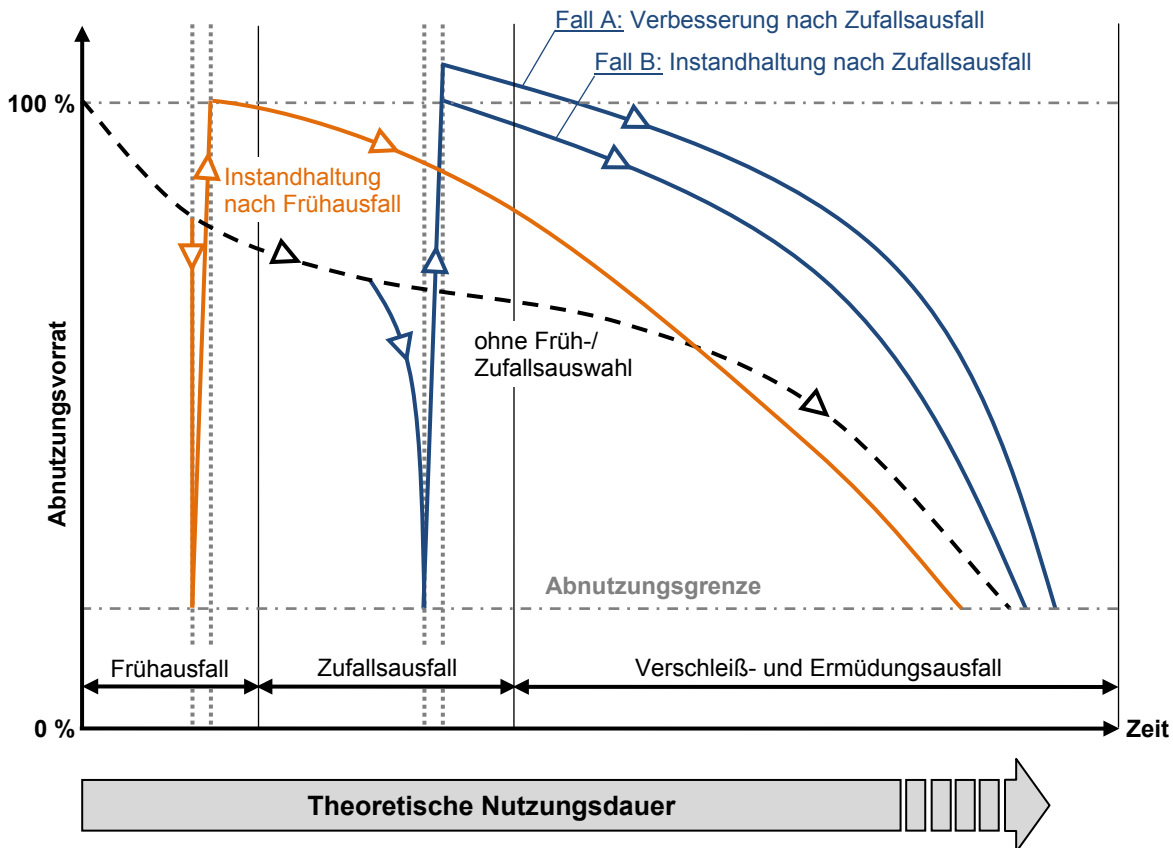


Abbildung 22: Definition der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten theoretischen Nutzungsdauer

Völlig unabhängig davon, wie der Abbau des Abnutzungsvorrates voranschreitet oder beeinflusst wird, ist davon auszugehen, dass das Erreichen der Abnutzungsgrenze stets zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgt. Die theoretische Nutzungsdauer stellt demnach einen auf statistischen Verfahren beruhenden Mittelwert dar. Das Vorgehen bei der Ermittlung von theoretischen Nutzungsdauern auf Basis einer statistischen Datengrundlage wird detailliert in Abschnitt 4.4.5 beschrieben.

3.5 Kosten im Lebenszyklus eines Bauwerks

3.5.1 Kosten als Beurteilungskriterium

Die Erläuterungen zum Lebenszyklus eines Bauwerks erfolgten bislang unabhängig davon, wie die daraus abzuleitenden Konsequenzen zu beurteilen sind. Um miteinander konkurrierende Planungsvarianten vergleichen zu können, muss ein entsprechendes Beurteilungskriterium vorhanden sein. Ein Parameter, der diese Forderungen erfüllt, sind die Kosten. Für sämtliche Einflüsse, die auf den Bauwerkslebenszyklus einwirken, lassen sich entweder Kosten direkt abschätzen oder durch geeignete Methoden in monetäre Größen umrechnen.

Mit Investitionen wird grundsätzlich das Ziel verfolgt, das Ergebnis einer Geschäftstätigkeit zu verbessern respektive den Wert eines Unternehmens zu steigern. Wie Schub und Stark [147] zum Ausdruck bringen, wird mit jedem Baugeschehen das Hauptziel verfolgt, einen aktuell vorliegenden Bedarf möglichst langfristig zu decken. Dies gilt sowohl für die Privatwirtschaft bei der Erstellung von Produktionsstätten als auch für die öffentliche Hand bei der Schaffung von Basiseinrichtungen. Als Basiseinrichtung kann zum Beispiel jegliche Art von Infrastruktur angesehen werden; sie trägt dazu bei, die Bedürfnisse der Bevölkerung zu decken und eine wirtschaftliche Entwicklung zu ermöglichen. Die Durchführung einer Investition stellt einen gewichtigen Vorgang dar, dem in der Regel eine intensive Prüfung vorausgeht. Da Projekte unter verschiedenen Rahmenbedingungen durchgeführt werden und zudem unterschiedlichste Zielstellungen verfolgen, können derartige Entscheidungsprozesse nicht als Routinevorgänge bezeichnet werden; projektspezifische Chancen und Risiken sind aus diesem Grund mit Hilfe eines gesonderten Prozesses abzuwägen.

Die Höhe der Erstinvestition stellt das einfachste Kriterium dar, um über die Realisierungschancen eines Projektes zu befinden. Aus der Gegenüberstellung von Kostenprognose und Finanzbudget wird zunächst ersichtlich, ob eine Investition überhaupt durchführbar ist. In der Regel werden hierbei die Bauwerkserstellungskosten für eine Entscheidungsfindung herangezogen, darüber hinausgehende Kostenanteile bleiben hingegen unberücksichtigt. Die Implementierung weiterer Aufwendungen in den Entscheidungsprozess kann, wie zuvor in Abbildung 15 anhand von Kausalitätsbeziehungen verdeutlicht, dazu beitragen, das Verhältnis zwischen anfänglichen und späteren Kosten nach der Inbetriebnahme zu verbessern.

Nach Günter et al. [89] liegt die besondere Schwierigkeit darin, dass in der Regel der Großteil der abzuschätzenden und fortzuschreibenden Kosten in der Zukunft liegt und von unvorhersehbaren, stochastischen Ereignissen abhängt. Fabrycky und Blanchard [67] vergleichen die Informationslage mit einem Eisberg, dessen Dimensionen von der Steuerbrücke eines Schiffes nicht vollumfänglich erfasst werden können (Abbildung 23).

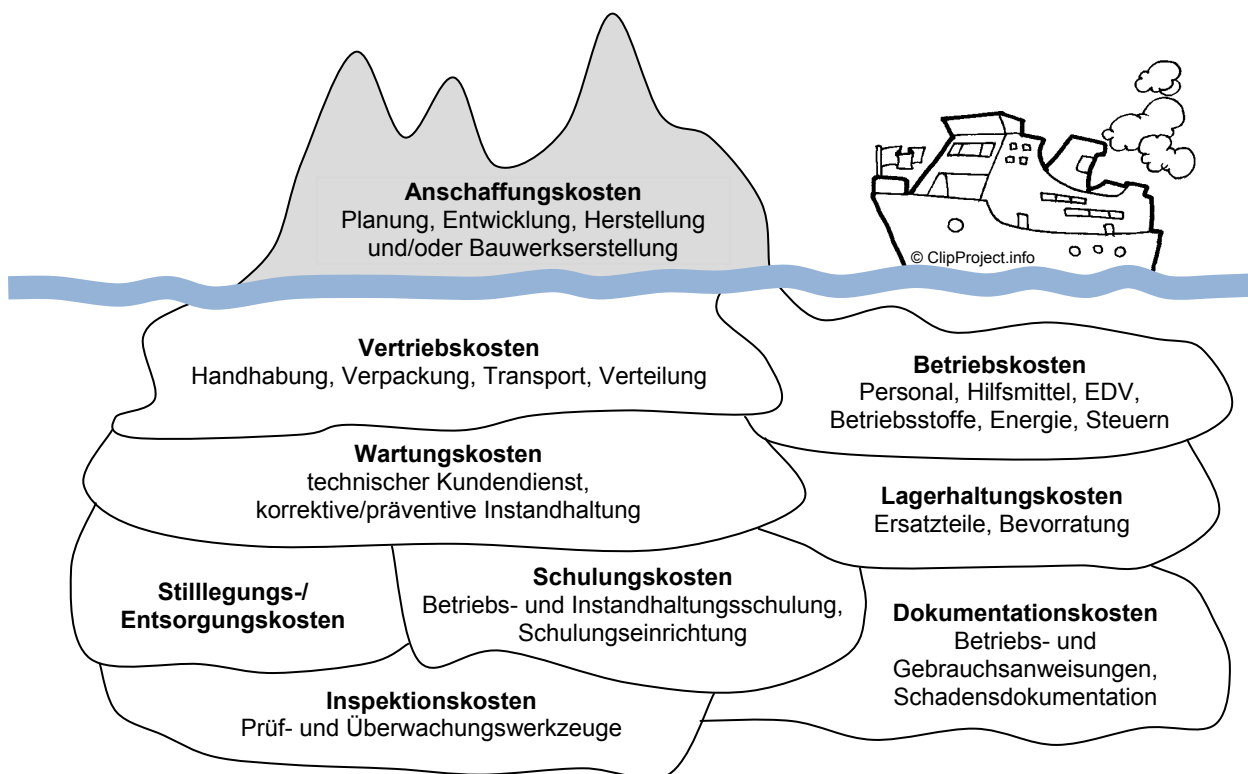


Abbildung 23: Das Problem der unübersichtlichen Kosten, nach [67]

Bei näherer Betrachtung besitzt die in Abbildung 23 dargestellte Problematik eine zweidimensionale Tragweite. Neben der Ermittlung der entsprechenden Kostenhöhe besteht die Herausforderung darin, den adä-

quaten Zeitpunkt abzuschätzen, zu dem die Berücksichtigung der einzelnen Kosten erfolgt. Jedoch sind ferner beide Dimensionen mit Unsicherheiten behaftet. Einerseits wird es aufgrund der langen Betrachtungsdauer von Bauwerkslebenszyklen zunehmend schwerer, die Höhe der jeweiligen Kostenanteile anzugeben, andererseits basiert, wie im vorherigen Abschnitt gezeigt, die Ermittlung der theoretischen Nutzungsdauer von Bauteilen und Baustoffen auf statistischen Verfahren.

Im Folgenden soll eine Übersicht dazu verschafft werden, wie in der Fachliteratur der Begriff der Lebenszykluskosten definiert ist und auf welche finanzmathematischen Ansätze die Lebenszykluskostenberechnung zurückgreift.

3.5.2 Stand der Forschung

Das Instrumentarium der Lebenszykluskostenbetrachtung kam nach Darstellung von Wübbenhorst [172] ab Mitte der 1960er Jahre in den USA bei Großinvestitionen im Militär- und Energiesektor erstmals in den Grundzügen der heute bekannten Form zur Anwendung. In Deutschland hat die Ermittlung der Lebenszykluskosten eines Bauwerks nach Darstellung von Pelzeter [132] erst nach Mitte der 1980er Jahre Eingang in die Forschung gefunden. Die Adaption der lebenszykluskostenorientierten Denkweise für das Fachgebiet des Hochbaus ist heute weit vorangeschritten und in die Richtlinien der German Facility Management Association (GEFMA) verankert. Wie Pelzeter [133] betont, hat das Lebenszykluskonzept bei der Kalkulation von öffentlichen Hochbauprojekten, die auf Basis einer Öffentlich Privaten Partnerschaft (ÖPP) abgewickelt werden, in Deutschland in den letzten Jahren an praktischer Bedeutung gewonnen. Aus derselben Publikation geht hervor, dass eine durch die Autorin initiierte Umfrage unter Akteuren in der Immobilienwirtschaft zu dem Ergebnis gekommen ist, dass über 50 % der Befragungsteilnehmer die Lebenszykluskosten als wichtig bei einer Entscheidungsfindung ansehen, jedoch nur 5 % der Befragten entsprechende Kostenberechnungen durchführen.

Steht die Ermittlung von Lebenszykluskosten im Fokus, so kann der Blickwinkel des Betrachters durchaus differieren: Während bei einem Immobilieninvestor ein hohes Interesse darin besteht, nach Abschluss der Bauphase eine maximale Rendite aus Vermietung oder Veräußerung zu erzielen, wird der Bauherr, der seine Immobilie selber nutzt, das Ziel verfolgen, Betrieb und Unterhaltung unter den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit und ggf. der Nachhaltigkeit zu gestalten.

Wie der Begriff „Lebenszyklus“ sind auch die Lebenszykluskosten nicht eindeutig in der Fachliteratur beschrieben. Einige Begriffsdefinitionen sowie die damit verbundenen Zielstellungen sollen im Folgenden komprimiert wiedergegeben werden:

Gemäß ISO/FDIS 15686-5 [104] erfüllen die Lebenszykluskosten alle an ein Bauwerk oder dessen Bauteile gestellten Anforderungen. Die aus der Lebenszykluskostenberechnung resultierende Erkenntnis dient als Eingangsparameter für einen Entscheidungs- oder Bewertungsprozess.

Die GEFMA-Richtlinie 220-1 [79] fasst die Lebenszykluskosten als die Summe aller über die Dauer der Nutzung von baulichen Anlagen anfallenden Kosten auf. Das Ziel einer derartigen Bestimmung ist in der Ermittlung der langfristig am vorteilhaftesten Ausführungsvariante zu sehen. Durch die Berechnung der Lebenszykluskosten lässt sich beispielsweise prüfen, ob es lohnenswert ist, anfänglich mehr zu investieren, um später von niedrigeren laufenden Kosten zu profitieren.

Die Anteile, die nach Badmann und Gerlach [5] zu den Lebenszykluskosten hinzugezählt werden müssen, resultieren aus Anschaffung, Betrieb, geplanter und ungeplanter fehlerbehebender Instandhaltung sowie Außerbetriebnahme, Verwertung oder Entsorgung. Aus der Ermittlung leiten sich Empfehlungen für Gestaltung und Beschaffung ab, wobei das Ziel die „Optimierung der gesamten Lebenszykluskosten“ ist.

Im Sinne des Lebenszyklusverständnisses kann also als ein Hauptkriterium die Unterteilung nach anfänglichen Kosten und späteren, funktionserhaltenden Aufwendungen vorgenommen werden. Die Kosten, die bis

zur Inbetriebnahme einer Anlage oder eines Bauwerks anfallen, werden im Rahmen dieser Arbeit als Initialkosten, alle weiteren Kosten zum Betrieb und zur Unterhaltung als Folgekosten aufgefasst. Unter den Verfassern der zitierten Quellen herrscht zudem darüber Konsens, eine Rangfolge derjenigen Varianten aufzustellen, die auf Grundlage identischer Abbildungsprinzipien ermittelt wurden. Die aus der Analyse von Initial- und Folgekosten resultierende Rangfolge führt zu einer abschließenden Investitionsentscheidung. Es lässt sich folglich postulieren, dass die Vorteilhaftigkeit einer Variante erst durch die rechnerische Verknüpfung der Initial- und Folgekosten deutlich wird; ein Vergleich auf Basis der Initialkosten kann indes zu einem anderen Ergebnis führen.

Die bisher erfolgte Auseinandersetzung mit den Lebenszykluskosten beinhaltet nur Auszahlungen (Kosten) und lässt etwaig vorhandene Einzahlungen (Erlöse) unberücksichtigt. Nach GEFMA 220-1 [79] werden die so ermittelten reinen Kosten als die Lebenszykluskosten „im engeren Sinne“ bezeichnet. Diese Betrachtungsweise trifft beispielsweise – mit der Ausnahme einiger weniger Mautprojekte – für den Betrieb einer Brücke oder eines Tunnels zu. Werden hingegen Bauwerke betrachtet, mit denen eine Rendite zum Beispiel aus Mieteinnahmen erwirtschaftet wird, so werden die Einzahlungen mit den Auszahlungen verrechnet. In Analogie zu den vorherigen Ausführungen handelt es sich hierbei um die Lebenszykluskosten „im weiteren Sinne“. Die Lebenszykluskosten im weiteren Sinne sind nach Definition der GEFMA-Richtlinie 220-1 [79] gleichbedeutend mit dem Lebenszyklus-Erfolg.

Die vier in Abschnitt 3.3.2 beschriebenen Lebenszyklusphasen Planung, Bau, Betrieb und Unterhaltung sowie Verwertung sollen im Folgenden anhand der Entwicklung von Kosten und Erlösen näher erörtert werden. Aufgrund der Langlebigkeit von Bauwerken werden die Ein- und Auszahlungen als sogenannte Barwerte abgebildet. Das Barwertkonzept basiert auf der Annahme, dass zukünftige Zahlungen unter Berücksichtigung des Fälligkeitszeitpunktes und unter Festlegung eines Zinssatzes heute einen geringeren Wert besitzen. Anders ausgedrückt führt der auf den heutigen Zeitpunkt bezogene Barwert dazu, einer Zahlung unter Ansatz der Verzinsung zu einem späteren, genau festgelegten Zeitpunkt, nachzukommen. Die Ermittlung von Barwerten bereits von der Höhe bekannter, aber in der Zukunft liegender Zahlungen wird auch Abzinsung oder Diskontierung genannt. Weisen zwei zukünftige Zahlungen gleiche Nominalwerte auf, liegen aber unterschiedlich lang vom heutigen Betrachtungszeitpunkt entfernt, so ist der heutige Barwert der weiter in der Zukunft liegenden Zahlung geringer. Das Gegenteil der Abzinsung ist die Verzinsung oder Askontierung. Das beschriebene Barwertkonzept ist in Abbildung 24 schematisch dargestellt. Die an die Pfeilverbindungen angetragenen Faktoren sind jeweils mit dem Ausgangswert zu multiplizieren, um den entsprechenden Bar- bzw. Nominalwert zu erhalten.

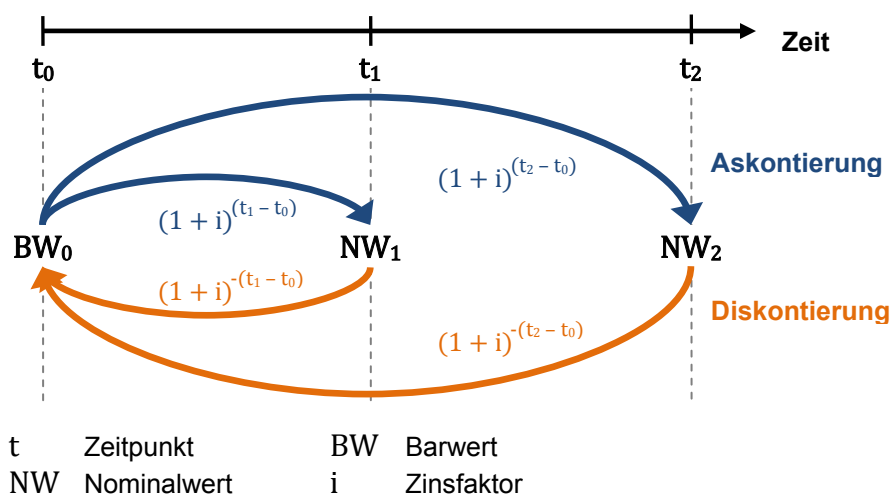


Abbildung 24: Verdeutlichung des Barwertkonzeptes

Der maßgebliche Vorteil des Barwertkonzeptes ist darin zu sehen, dass der Zeitaspekt der Geldwertentwicklung mithilfe eines Zinsfaktors Berücksichtigung findet. Weisen die verschiedenen, miteinander konkurrierenden Investitionsalternativen einen identischen Bezugszeitpunkt auf, so sind alle Alternativen direkt miteinander vergleichbar; anderenfalls ist keine valide Vergleichsbasis vorhanden.

Unter Zuhilfenahme fiktiver Barwerte sind in Abbildung 25 Kosten- und Erlösprognosen für ein nicht näher zu spezifizierendes Bauwerk über den gesamten Bauwerkslebenszyklus aufgetragen. Als Bezugszeitpunkt der Darstellung wurde der Beginn der Planungsphase festgelegt, so dass sämtliche Werte einen prognostischen Charakter annehmen und den Stellenwert von Soll-Kosten und -Erlösen widerspiegeln. Im oberen Diagramm sind die Barwerte über einzelne, identisch lange Abrechnungsperioden aufgetragen. Während in der Planungs- und Bauphase die Auszahlungen dominieren, sind ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme Einnahmen zu verzeichnen. Die Betriebs- und Unterhaltungsphase zeichnet sich durch stetige Kosten für den Betrieb und die Bauwerksunterhaltung aus, in größeren Zeitintervallen sind Instandhaltungsmaßnahmen durchzuführen, die deutliche Kosten in einzelnen Abrechnungsperioden hervorrufen. Das untere Diagramm zeigt den Verlauf der kumulierten Barwerte aus Kosten und Erlösen. Die Summe aller Barwerte wird auch als der Kapitalwert bezeichnet und ist für den hier verfolgten Anwendungsfall mit dem Begriff der Lebenszykluskostenberechnung gleichzusetzen. Da das in Abbildung 25 aufgeführte Beispiel im Zuge der Kapitalwertermittlung die Erlösseite mitberücksichtigt, handelt es sich um die „Lebenszykluskosten im weiteren Sinne“, aus denen auch der Lebenszyklus-Erfolg abgeleitet werden kann. Ein vorteilhafter Lebenszyklus-Erfolg drückt sich dadurch aus, dass der nach heutiger Prognose zum Ende des Betrachtungszeitraums ermittelte Kapitalwert einen positiven Wert aufweist. Anderenfalls ist die Investition nicht empfehlenswert und es ist einer anderen Alternative der Vorzug zu geben. Im Übrigen ist auch die Unterlassung einer Investition, also die Beibehaltung des Status-Quo, als eine eigenständige Alternative zu betrachten.

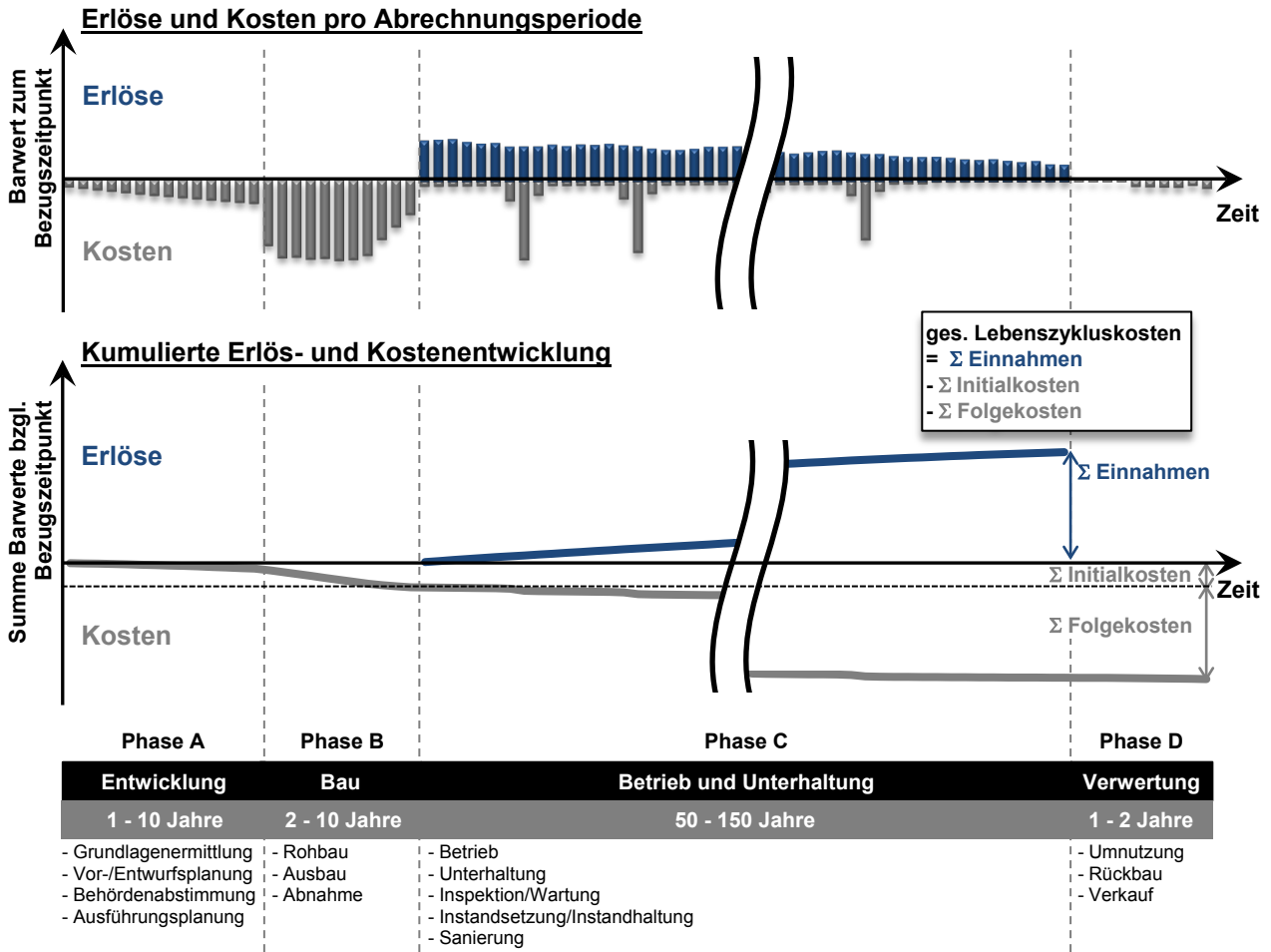


Abbildung 25: Das Bauwerk im Lebenszyklus mit qualitativer Entwicklung der Kosten und Erlöse

Zusammenfassend sind die Barwertanteile, welche die Ermittlung der gesamten Bauwerkslebenszykluskosten ermöglichen, im unteren Bereich der Abbildung 25 eingetragen. Die Barwertsummen von Initial- und Folgekosten sind betriebswirtschaftlich gesehen Auszahlungen und stellen einen Liquiditätsabgang dar; sie sind mit einem negativen Vorzeichen versehen. Entsprechend handelt sich bei der Barwertsumme der Erlöse um Einzahlungen; diese erhalten ein positives Vorzeichen. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass der resultierende Kapitalwert bzw. Lebenszyklus-Erfolg nicht zu Fehlinterpretationen oder -entscheidungen führt.

Kam der Lebenszyklusgedanke zunächst fast ausschließlich im Immobiliengewerbe zur Anwendung, so können seit einigen Jahren auch zunehmende Forschungsaktivitäten im Ingenieurbausektor registriert werden. Für den Brückenbau sind Publikationen von Jodl [105], [106], Empelmann und Heumann [65], Schach et al. [145] und Frangopol und Bocchini [75] zu nennen, für den Siedlungswasserbau wird auf die Veröffentlichung von Günter et al. [89] verwiesen. Beiträge von Thewes et al. [155], Leismann und Leucker [119] und Girmscheid et al. [82], [83] verknüpfen die Versinterungsproblematik von Tunneldrainagen mit Lebenszykluskostenbetrachtungen. Es ist davon auszugehen, dass die Lebenszykluskostenanalyse in der gesamten Bauwirtschaft in den nächsten Jahren weiter an Bedeutung gewinnen wird. Insbesondere die öffentliche Hand wird sich aufgrund der angespannten Haushaltslage in Zukunft eingehender mit Lebenszykluskostenanalysen beschäftigen müssen. Neben der Realisierung neuer Bauvorhaben wird dies die Erhaltung und Modernisierung von Bestandsbauwerken etwa im Bildungs-, Verwaltungs- und Infrastrukturbereich betreffen.

3.5.3 Ansätze zur Berechnung der Lebenszykluskosten

Bei der Berechnung der Lebenszykluskosten im engeren Sinne steht die Minimierung der Summe aller Initial- und Folgekosten zu einem fest definierten Bezugszeitpunkt im Vordergrund, wohingegen bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten im weiteren Sinne die Maximierung der Rendite verfolgt wird. Beide Zielstellungen lassen sich über die Anwendung der Verfahren der Investitionsrechnung erreichen. Sämtliche Informationen, die außerhalb der Investitionsrechnung verarbeitet werden und nicht monetär erfassbar sind, werden nach Kruschwitz [116] als Imponderabilien bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit werden Imponderabilien, beispielsweise zählen dazu veränderte rechtliche Rahmenbedingungen, nicht weiter betrachtet. Es wird die Annahme getroffen, dass Imponderabilien keinen Einfluss auf die Lebenszykluskostenanalyse ausüben. Alle sonstigen Einflüsse, die sich in Geldwerten ausdrücken lassen, finden hingegen Einzug in die Berechnung; diese sonstigen Einflüsse sind folglich nicht als Imponderabilien anzusehen.

Die Wahl eines geeigneten Berechnungsverfahrens ist zum einen davon abhängig, in welchem Umfang Eingangsparameter vorliegen, zum anderen ist festzulegen, welche Aussagen auf Basis der späteren Berechnungsergebnisse ermöglicht werden sollen. Die Verfahren der Investitionsrechnung lassen sich, wie beispielsweise bei Möller und Kalusche [126], Grob [88] oder bei Poggensee [139] beschrieben, in statische und dynamische Berechnungsmethoden unterteilen. Während bei statischen Verfahren das gesamte Investitionsgeschehen für eine Durchschnittsperiode – also unabhängig vom Zeitpunkt einer Ein- oder Auszahlung – ermittelt wird, berücksichtigen dynamische Verfahren aufgrund einer eigenen Zinseszinskomponente, dass Zahlungen mit gleichem Nominalbetrag zu unterschiedlichen Zeitpunkten fällig werden. Kruschwitz grenzt in [116] statische und dynamische Verfahren wie folgt voneinander ab: Während bei der statischen Betrachtung über den gesamten Nutzungszeitraum periodisierte Abschreibungen vorgenommen werden, erfolgt bei der dynamischen Berechnung ein Rückgriff auf die eigentlichen Ein- und Auszahlungen.

Aus den bisherigen Ausführungen zum Lebenszykluskostenkonzept ist zu folgern, dass bei Bauobjekten aufgrund der langen Nutzungsdauern die Berücksichtigung von Zahlungszeitpunkten und Zinseszinswirkungen nicht vernachlässigt werden darf. Des Weiteren können Ein- und Auszahlungen beträchtliche Schwankungen aufweisen und nicht notwendigerweise periodisch wiederkehren. Für das Investitionsgeschehen bei Bauwerken ist charakteristisch, dass während der Bauphase zunächst hohe Auszahlungen erfolgen und ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme wechselnde Aus- und gegebenenfalls Einzahlungen zu verzeichnen sind. Es wird das Resümee gezogen, dass die statischen Berechnungsmethoden unter den beschriebenen Randbedingungen nur überschlägliche Ergebnisse liefern und für die beabsichtigte Zielstellung nicht anwendbar sind. Weitergehende Ausführungen zu den Eigenschaften der statischen Verfahren finden sich bei Kruschwitz [116] oder Herzog [96].

Die im Folgenden näher zu betrachtenden dynamischen Berechnungsmethoden basieren auf dem in Abbildung 24 illustrierten Barwertkonzept. Wie aus Abbildung 24 ersichtlich wird, stehen drei zentrale Größen in einem direkten Abhängigkeitsverhältnis zueinander:

- über den Betrachtungszeitraum bzw. über die gewählte Lebenszykluskostendauer erfolgen Ein- und Auszahlungen mit vorbestimmten Nominalwerten,
- jeder Ein- und Auszahlung kann ein spezifischer Zeitpunkt oder ein hinreichend genau festzustellender Zeitraum zugeordnet werden,
- Ein- und Auszahlung werden mit Soll- und Habenzinssätzen beaufschlagt.

In Abhängigkeit davon, welche der drei Größen bei der Untersuchung der Vorteilhaftigkeit im Vordergrund stehen, lässt sich ein geeignetes dynamisches Verfahren wählen. Die dynamischen Verfahren, die bei der Analyse der Bauwerkslebenszykluskosten Anwendung finden, sollen im Folgenden näher beschrieben und untereinander abgegrenzt werden.

Vollständiger Finanzplan („Visualization of Financial Implications“)

Die Vorteilhaftigkeit einer Investition kann mithilfe eines vollständigen Finanzplans (VoFi) bewertet werden. Dabei handelt es sich um ein Verfahren, das sämtliche Zahlungen über die Dauer des Lebenszyklus eines Bauwerks unter Zuhilfenahme einer Kalkulationstabelle abbildet. Nach Hufnagel und Meßmann [101] lassen sich die Zahlungen, die in einen vollständigen Finanzplan aufgenommen werden, nach originären und derivaten Werten differenzieren. Als originäre Werte werden die durch den Entscheidungsträger zu prognostizierenden Aus- und Einzahlungen bezeichnet. Derivate Werte werden hingegen direkt aus den originären Werten abgeleitet und somit nicht unmittelbar vom Entscheidungsträger vorgegeben. Zu den derivaten Werten zählen Finanzierungs- oder Steuerzahlungen.

Das Vorgehen bei der Erstellung eines vollständigen Finanzplans erfolgt nach einem festgelegten Schema, welches bei Hufnagel und Meßmann [101] beschrieben wird: Zunächst werden für den Zeitpunkt, zu dem die Betrachtungen beginnen sollen (d.h. $t=0$) die originären Größen, wie Ein- und Auszahlungen bzw. der Anfangsbestand an Eigenkapital in das VoFi-Kalkulationsblatt eingetragen. Mit dem Ziel, ein finanzielles Gleichgewicht für den Zeitpunkt $t=0$ zu etablieren wird ermittelt, ob die Aufnahme eines Kredits erforderlich oder die Anlage von Überschüssen möglich ist. Die festgelegten Kredit- und Anlagenhöhen werden danach in die entsprechenden Zellen der Kalkulationstabelle eingetragen; sie spiegeln für den Zeitpunkt $t=0$ die derivaten Werte wider. Für den Zeitpunkt der VoFi-Eröffnung wird am Ende ein Bestandssaldo gebildet und es erfolgt der Übergang zum Zeitpunkt $t=1$. Die zeitliche Schrittfolge beim VoFi beträgt per Definition ein Jahr.

In Analogie zum zuvor beschriebenen Vorgehen sind die mit dem Zeitpunkt $t=1$ verbundenen originären Ein- und Auszahlungen wiederum in die Tabelle einzutragen. Im Anschluss daran sind die Auswirkungen aus der Kreditaufnahme bzw. der Geldanlage zum vorangegangenen Zeitpunkt monetär zu bewerten und durch etwaige Steuerzahlungen zu ergänzen. Die Aufnahme eines Kredits kostet einen bestimmten Soll-Zinssatz, Überschüsse werfen einen bestimmten Haben-Zinssatz ab. Soll- und Haben-Zinssatz können nach der Methodik des VoFi unterschiedliche Werte aufweisen und zudem von Zeitschritt zu Zeitschritt variieren. Nach Kruschwitz [116] hängt die Höhe des Soll-Zinssatzes davon ab, wie sich Nachfrage und Angebot auf dem Kapitalmarkt entwickeln, welches Risiko mit einem Engagement verbunden ist und wie die Bonität eines Kreditnehmers eingeschätzt wird. Nach Verrechnung der Soll- und Habenzinsen sowie der Abführung von Steuern muss entschieden werden, im welchem Umfang zum Zeitpunkt $t=1$ Kredite zu tilgen, Neuanlagen durchzuführen oder Entnahmen vorzunehmen sind. Aus den vorangegangenen Aussagen wird ersichtlich, dass mit der Aufstellung vollständiger Finanzpläne, wie in [116] erläutert, zwei Ziele zum Vergleich von Investitionsalternativen verfolgt werden können. Im ersten Fall, dem Vermögensstreben, steht beispielsweise die jährliche Entnahme gleichhoher Geldeinheiten bei unterschiedlichen Endvermögen im Vordergrund. Das sogenannte Einkommensstreben sieht im zweiten Fall beim Vergleich verschiedener Investitionsalternativen hingegen ein identisches Endvermögen als Zielstellung an. Hieraus wird ersichtlich, dass vor Ausarbeitung der Finanzplanung genau definiert werden muss, welche Strategie der Investor verfolgen möchte. Auch ist erkennbar, dass die Steuerung einer VoFi-Kalkulation ausschließlich über die derivaten Größen erfolgt und die Anzahl möglicher VoFis sehr hoch sein kann.

Auch für den Zeitpunkt $t=1$ erfolgt abschließend die Aufstellung des Bestandssaldos. Das Vorgehen wird in gleicher Weise für alle folgenden Zeitpunkte bis zum Erreichen der Lebenszyklusdauer $t=n$ fortgesetzt. Der Bestandssaldo zum Zeitpunkt $t=n$ entspricht dem Endwert der betrachteten Investitionsalternative. Die abschließende Bewertung der Vorteilhaftigkeit auf Grundlage eines VoFis wird durch die Ermittlung der Opportunität ermöglicht. Dabei wird das zu Beginn eingesetzte Eigenkapital über die Gesamtdauer des Lebenszyklus mit einem Haben-Zinssatz beaufschlagt und vom Endwert der Investitionsalternative subtrahiert. Ist die resultierende Differenz positiv, so ist die Investitionsalternative als vorteilhaft einzustufen. In Tabelle 9 ist ein beispielhafter VoFi für eine fiktive Investitionsalternative A über eine Lebenszyklusdauer von fünf Jahren

aufgeführt. Im Anschluss an die Tabelle wird das methodische Vorgehen zur Interpretation des Ergebnisses aufgezeigt.

Zeitpunkt	t=0	t=1	t=2	t=3	t=4	t=5
Originäre Zahlungen						
Auszahlung	-300.000					
Einzahlung		100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Restwert						80.000
Derivate Zahlungen						
Eigenkapital						
Anfangsbestand	10.000					
Entnahmen						
Einlagen						
Kredit						
Aufnahme	290.000					
Tilgung		-71.000	-78.100	-85.910	-54.990	
Sollzinsen (10%)		-29.000	-21.900	-14.090	-5.499	
Geldanlage						
Anlage					-39.511	-182.765,77
Auflösung						
Habenzinsen (7%)						2.765,77
Finanzierungssaldo	0	0	0	0	0	0
Bestandsgrößen						
Kreditbestand	290.000	219.000	140.900	54.990	0	0
Guthabenstand	0	0	0	0	39.511	222.276,77
Bestandssaldo	-290.000	-219.000	-140.900	-54.990	39.511	222.276,77

Tabelle 9: Exemplarischer VoFi für die Investitionsalternative A, modifiziert nach [101]

Der Endwert (EW) der in Tabelle 9 gezeigten Investitionsalternative A beträgt $EW^A = 222.276,77 \text{ €}$.

Der Endwert der Opportunität EW^O hingegen drückt aus, welches Ergebnis der Eigenkapitalbesitzer zu erwarten hätte, wenn er anstatt der Investition über die Dauer von 5 Jahren das Eigenkapital (EK) auf einer Bank zu einem Habenzins von 7 % anlegen würde:

$$EW^O = EK * 1,07^5 = 10.000 * 1,07^5 = 14.025,52 \text{ €}$$

Aus der Differenz ergibt sich $\Delta EW = EW^A - EW^O = 208.251,25 \text{ €}$.

Da der Wert positiv ist, ist die Investitionsalternative insgesamt als vorteilhaft einzustufen.

Kapitalwertmethode („Net present value“)

Gemeinsames Merkmal von Kapitalwertmethode und VoFi-Methodik ist, dass beide Verfahren auf die identischen originären Zahlungsströme zurückgreifen. Die Komplexität, die bei der Aufstellung von VoFis bezüglich des Umgangs mit den derivaten Zahlungen vorherrscht, macht, um eine bessere Handhabung zu erreichen, weitere Vereinfachungen erforderlich. Soll- und Haben-Zinsen können in Anlehnung an Kruschwitz [116] in drei unterschiedlichen Verhältnissen zueinander stehen: Entweder die Soll-Zinsen sind größer oder kleiner als die Haben-Zinsen oder beide Größen sind identisch. Wurde beim VoFi davon ausgegangen, dass die Soll-Zinsen höher als die Haben-Zinsen sind, stellt der umgekehrte Fall einen offensichtlichen Widerspruch zur Realität dar und kann somit ausgeschlossen werden. Als einzige Vereinfachung bleibt der Fall bestehen, dass Soll- und Haben-Zinsen denselben Wert annehmen. Unter diesen Rahmenbedingungen kann sowohl für eigene liquide Mittel, als auch für Fremdkapital der gleiche Zinsfuß angenommen werden. Folglich ist es nach Hufmann und Meßmann [101] bei identischem Zinsfuß unerheblich, ob durch Geldanlagen Guthabenzinsen erwirtschaftet oder durch Tilgung von Krediten Soll-Zinsen eingespart werden. Eine weitere Simplifizierung betrifft die Verfügbarkeit von Geldmitteln am Kapitalmarkt. Es soll angenommen werden, dass Geld nie knapp wird und jederzeit geliehen werden kann. Der besondere Fall, dass der Soll- dem Haben-Zinssatz entspricht und kein Finanzierungslimit vorhanden ist, wird in der Betriebswirtschaftslehre nach Kruschwitz [116] als „vollkommener und unbeschränkter Kapitalmarkt“ bezeichnet.

Die Voraussetzungen zur Anwendung der Kapitalwertmethode sind durch die zuvor getroffenen Vereinfachungen erfüllt. Grundlegendes Instrument der Kapitalwertmethode ist die Diskontierung der einzelnen Ein- und Auszahlungen gemäß der in Abbildung 24 aufgezeigten Barwertmethode. Dieser Berechnung liegt die Annahme zugrunde, dass die Zinskapitalisierung zum Ende einer Jahresperiode erfolgt und somit nachschüssig ist. Eine vorschüssige oder gar unterjährige Verzinsung ist indes bei Lebenszykluskostenberechnungen unüblich und daher nicht Gegenstand weiterer Betrachtungen.

Eine Basis zum Vergleich sämtlicher diskontierter Zahlungen ist dann gegeben, wenn sich diese auf einen gemeinsamen Bezugszeitpunkt beziehen. Auf diese Weise wird die Zeitstruktur der mit einer Investition verbundenen Zahlungen berücksichtigt. Liegt diese Voraussetzung vor, so errechnet sich der Kapitalwert unter Berücksichtigung der zuvor getroffenen Vorzeichenkonvention als Summe der Barwerte aller Ein- und Auszahlungen. Wird der Bezugszeitpunkt der Berechnung, also $t=0$, mit dem Fertigstellungszeitpunkt der Bauwerkvariante j gleichgesetzt, so ergibt sich der zugehörige Kapitalwert $K_{j,t=0}$ über die Dauer der gesamten Lebenszyklusperiode T in Anlehnung an Kishk et al. [109] und Herzog [96] zu:

$$K_{j,t=0} = IK_{j,t=0} + \sum_{t=0}^T \frac{BK_{j,t}}{(1+i)^t} + \sum_{t=0}^T \frac{EK_{j,t}}{(1+i)^t} + \sum_{t=0}^T \frac{ER_{j,t}}{(1+i)^t} + \frac{VW_{j,T}}{(1+i)^T} + \frac{RK_{j,T}}{(1+i)^T} \quad (\text{Formel 3.1})$$

wobei:

$K_{j,t=0}$ Kapitalwert der Variante j zum Zeitpunkt $t=0$

$IK_{j,t=0}$ Initialkosten zur Erstellung der Bauwerksvariante j zum Bezugszeitpunkt $t=0$

t, T Zeitvariable t bzw. Gesamtperiode T

i feststehender Zinsfuß in Dezimalschreibweise

$\sum_{t=0}^T \frac{BK_{j,t}}{(1+i)^t}$ Summe der diskontierten Betriebs- und Unterhaltungskosten

$\sum_{t=0}^T \frac{EK_{j,t}}{(1+i)^t}$ Summe der diskontierten Erhaltungs- bzw. Instandhaltungskosten

$\sum_{t=0}^T \frac{ER_{j,t}}{(1+i)^t}$ Summe der diskontierten Erlöse

$\frac{VW_{j,T}}{(1+i)^T}$ diskontierter Verkaufswert zum Zeitpunkt T

$\frac{RK_{j,T}}{(1+i)^T}$ diskontierte Rückbaukosten zum Zeitpunkt T

Die oben stehende Formel 3.1 zur Errechnung des Kapitalwerts setzt voraus, dass der einheitliche Soll- und Habenzinssatz auch über die Zeit nicht variiert. Dieser Fall wird in der Fachliteratur, z.B. bei Götze [85], als der „Kapitalwert mit flacher Zinskurve“ bezeichnet. Unter der Voraussetzung, dass der Soll- immer dem Haben-Zinssatz entspricht, kann hingegen die Annahme getroffen werden, dass der einheitliche Zinssatz von Periode zu Periode variiert. Unter diesen Voraussetzungen wird von einem „Kapitalwert bei nicht-flacher Zinskurve“ gesprochen. Die verwendeten Zinssätze werden je nach Zeitpunkt der Implementierung in das Rechenmodell nach Kruschwitz [116] als „Kassazinssatz“ oder als „Terminzinssatz“ bezeichnet. Der Kassazinssatz ergibt sich, wenn zum Zeitpunkt $t=0$ der Betrag B_0 ausgezahlt wird und zum Zeitpunkt t der Betrag B_t zurückzuzahlen ist, nach [116] zu:

$$i_{0,t} = \sqrt[t]{\frac{B_t}{B_0}} - 1 \quad (\text{Formel 3.2})$$

wobei:

$i_{0,t}$ feststehender Zinsfuß der zusammenhängenden Periode $[0;t]$

B_0, B_t Betrag zum Zeitpunkt 0 bzw. t

Handelt es sich hingegen um einen Terminzinssatz, so macht ein Finanzinstitut zum Zeitpunkt $t=0$ die Zusage, zum Zeitpunkt $t=1$ einen Kredit in Höhe des Betrages B_{t1} zu gewähren. Der Kreditnehmer verpflichtet sich, den Betrag B_{t2} zum Zeitpunkt $t=2$ zurückzuzahlen. Der Terminzinssatz für einjährige Kredite ist nach [116] wie folgt definiert:

$$i_{t-1,t} = \frac{B_t}{B_{t-1}} - 1 \quad (\text{Formel 3.3})$$

wobei:

$i_{t-1,t}$ feststehender Zinsfuß in der einjährigen Periode $[t-1;t]$

B_t, B_{t-1} Betrag zum Zeitpunkt $t-1$ bzw. t

Zur Errechnung des Kapitalwertes muss Formel 3.1 unter Berücksichtigung der entsprechenden Zinssätze ergänzt werden.

$$K_{j,t=0} = IK_{j,t=0} + \sum_{t=0}^T \frac{BK_{j,t}}{\prod_{z=0}^t (1+i_{z,z+1})} + \sum_{t=0}^T \frac{EK_{j,t}}{\prod_{z=0}^t (1+i_{z,z+1})} + \sum_{t=0}^T \frac{ER_{j,t}}{\prod_{z=0}^t (1+i_{z,z+1})} + \frac{1}{\prod_{z=0}^T (1+i_{z,z+1})} \times [VW_{j,T} + RK_{j,T}] \quad (\text{Formel 3.4})$$

Der Kapitalwert drückt die Summe des Geldes aus, die heute investiert werden muss, um die mit dem gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks im Zusammenhang stehenden Verpflichtungen erfüllen zu können. Die Voraussetzung dafür, Varianten untereinander zu vergleichen, ist, dass deren Betrachtungsperioden gleich lang sind. Das Vorhaben mit dem höchsten positiven Kapitalwert ist die vorteilhafteste Alternative und im Zuge eines Entscheidungsprozesses bevorzugt auszuwählen.

Eine Modifikation der Kapitalwertmethode stellt die Annuitätenmethode dar. Sie basiert auf dem Ergebnis der Kapitalwertmethode, indem der errechnete Kapitalwert einer Investition periodisiert wird. Dabei erfolgt eine Transformation des Kapitalwerts in eine äquivalente Zahlungsreihe von gleich bleibender Höhe über die gesamte Betrachtungsdauer. Unter Berücksichtigung des Zinseszinseseffektes kann aus dem Kapitalwert eine jährlich gleichbleibende Zahlung, die sogenannte Annuität, ermittelt werden. Die Annuität A einer Variante j wird in Anlehnung an Kishk et al. [109] folgendermaßen berechnet:

$$A_j = K_{j,t=0} \times \frac{(1+i)^T \times i}{(1+i)^T - 1} \quad (\text{Formel 3.5})$$

Der Vorteil der Annuitätenmethode liegt darin, Investitionsalternativen mit unterschiedlichen Lebenszyklusdauern vergleichen zu können. Ein Vergleich von Alternativen mit unterschiedlichen Betrachtungsdauern ist lediglich auf Grundlage des Ergebnisses der Kapitalwertmethode nicht möglich. Unter mehreren Alternativvorhaben ist die Variante auszuwählen, die die höchste positive Annuität aufweist.

3.5.4 Der strategische Umgang mit Initial- und Folgekosten

Bauherren müssen sich sehr früh damit auseinandersetzen, die Kosten für ein Bauprojekt in Einklang mit dem Budget von der Höhe her zu begrenzen. Dabei sollten die Initialkosten zwar als notwendiges, nicht aber als hinreichendes Kriterium angesehen werden. Vielmehr sind im Sinne des Lebenszyklusverständnisses auch die Folgekosten zu prognostizieren, die für Betrieb, Unterhaltung, Instandhaltung, Sanierung und ggf. für die Verwertung des Bauwerks anfallen. Die Kosten für die Bauwerkserstellung beinhalten auch immer eine Aussage dazu, wie die resultierende Qualität des Bauwerks insgesamt einzuordnen ist. So kann die Wahl einer effizienten Komponente, z.B. der Einbau einer energiesparenden Tunnelbeleuchtung, dazu führen, dass die Energiekosten sinken. Über die gesamte Dauer des Lebenszyklus eines Bauwerks gesehen führen geringere Folgekosten dazu, dass eine höhere Anfangsinvestition langfristig ausgeglichen wird und ab einem bestimmten Zeitpunkt zu Einsparungen führt.

Aus der einführend erläuterten Problematik leitet sich ab, dass aus dem Blickwinkel der Planungsphase die Interaktion zwischen den Initial- und den Folgekosten von höchstem Interesse ist. Bei einem Bestandsbauwerk resultieren hingegen die Effizienzgewinne nur aus einem strategischen Umgang mit den Folgekosten. Um die aufgeführten Abhängigkeiten näher zu untersuchen, sollen im Folgenden Planungs- und Betriebsphase einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Planungsphase

Unter der wirtschaftlichen Planung eines Bauwerks wird nach Möller und Kalusche [126] die „gedankliche Vorwegnahme des zukünftigen Handelns“ verstanden. In aufeinanderfolgenden Schritten wird das Bauwerk mit zunehmender Detailschärfe an die örtlichen Randbedingungen und an die durch den Bauherrn festgelegte Funktionalität angepasst. Je detaillierter die örtlich herrschenden Randbedingungen bekannt sind, desto zielgerichteter und effizienter kann die weitere Bauwerksplanung erfolgen. Werden aufgrund verbindlich vorliegender Rahmenbedingungen Planungsentscheidungen getroffen, so muss der weitere Planungsprozess stets konsequent auf den zuvor dokumentierten Überlegungen aufbauen; anderenfalls droht der Abbruch einer kausal-schlüssigen Planungskette mit nicht oder nur schwer absehbaren wirtschaftlichen Folgen.

Ist mit dem Beginn der Planungsphase der Einfluss auf die Kosten wegen bisher nicht vorliegender Planungszwänge als weitgehend unbeschränkt zu bezeichnen, so geht mit dem Planungsfortschritt auch die sukzessive Konkretisierung der Initial- und Folgekosten einher. Den frühen Planungsstufen kann demzufolge ein sehr hoher Stellenwert beigemessen werden. Unter Zuhilfenahme der Terminologien der „Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen“, kurz HOAI [39], der DIN 276 „Kosten im Bauwesen“ [50] sowie der DIN 18960 „Nutzungskosten im Hochbau“ [54] sollen zunächst, wie auch resümierend in Tabelle 10 angegeben, die phasenbezogenen Planungstätigkeiten den jeweiligen Stufen der Kostenermittlung gegenübergestellt werden.

Als Ausgangspunkt jedweder Planungsaktivität ist die DIN 18205 „Bedarfsplanung im Bauwesen“ [53] heranzuziehen. Die Bedarfsplanung wurde eingeführt, da „bisher die Aufmerksamkeit für die Frühphase von Bauplanungsprozessen gering“ ist. Die DIN 18205 hat nach Auffassung der Verfasser „sowohl für das Einzelprojekt als auch für das Bauwesen insgesamt und seine volkswirtschaftlichen Konsequenzen erhebliche Bedeutung“. Für den Planungsingenieur sowie für alle weiteren am Bauprojekt Beteiligten soll die Bedarfsplanung geeignete Prozesse aufzeigen, um „Bedürfnisse, Ziele und einschränkende Gegebenheiten zu ermitteln und zu analysieren“. Dazu wird durch die DIN 18205 eine Sammlung von Prüflisten zur Verfügung gestellt. Nach DIN 276-1 endet die Bedarfsplanung mit der Ermittlung eines ersten Kostenrahmens.

An die Bedarfsplanung schließt die erste Leistungsphase der HOAI an; sie umfasst die Grundlagenermittlung, bei der die Klärung der Aufgabenstellung und die Abschätzung der erforderlichen Planungsleistungen im Vordergrund stehen. Auch werden notwendige Vorarbeiten wie die Untersuchung des Baugrundes und die Vermessung des Baufeldes vorgenommen. Die Grundlagenermittlung schließt mit der Aufstellung eines Kostenüberschlags ab; dieser basiert maßgeblich auf den Ergebnissen abgeschlossener Vergleichsprojekte. Stehen keine adäquaten Vergleichsobjekte zur Verfügung, so erfolgt eine grobe Abschätzung unter Zuhilfenahme von Indexwerten.

Die Erarbeitung eines Planungskonzeptes einschließlich der Untersuchung alternativer Lösungsmöglichkeiten ist Gegenstand der zweiten HOAI-Leistungsphase, der Vorplanung. Es werden erste zeichnerische Darstellungen erarbeitet und Vorverhandlungen mit Fachbehörden und sonstigen Beteiligten über die generelle Genehmigungsfähigkeit geführt. In dieser Phase werden auch grundlegende technische, bauwirtschaftliche und ökonomische Entscheidungen unter Beachtung der Umweltverträglichkeit getroffen. Die Kostenschätzung bzw. die Nutzungskostenschätzung bilden den Abschluss der Vorplanung und sind bezüglich des Detaillierungsgrades mindestens bis zu der in der DIN 276-1 definierten ersten Gliederungsebene zu ermitteln.

Es folgt die Entwurfsplanung, deren Inhalt die stufenweise Erarbeitung zeichnerischer Darstellungen sowie die Erstellung eines ergänzenden Erläuterungsberichtes ist. In dieser Phase sind darüber hinaus Bauzeiten- und Kostenpläne aufzustellen und Finanzierungsanträge vorzubereiten. Die Kostenberechnung und die Nutzungskostenberechnung bilden den Abschluss der Entwurfsplanung und werden kalkulatorisch mindestens bis zur zweiten Gliederungsebene gemäß DIN 276-1 fortgeführt. Eine erste Kostenkontrolle ist auf Basis des Vergleichs zwischen Kostenschätzung und -berechnung bzw. zwischen Nutzungskostenschätzung und -berechnung möglich.

Die vierte Leistungsphase der HOAI sieht die Erarbeitung der Genehmigungsplanung vor. Kerntätigkeiten sind die Erstellung von Grunderwerbsplänen und Grunderwerbsverzeichnissen sowie die Erarbeitung eines Planungsstatus, der zur öffentlich-rechtlichen Prüfung den Fachbehörden vorzulegen ist. Bei öffentlichen Infrastrukturmaßnahmen mit großer Tragweite wird zu diesem Zeitpunkt ein Planfeststellungsverfahren notwendig (vgl. Abschnitt 3.3.1).

Nach Abschluss der behördlichen Prüfung wird in der fünften HOAI-Leistungsphase die Ausführungsplanung erstellt. Die aus der Prüfung der Genehmigungsplanung von den Behörden aufgestellten Forderungen werden hierin umgesetzt sowie ergänzende rechnerische Nachweise ausgearbeitet. Mit Abschluss dieser Phase stehen Planungsunterlagen zur Verfügung, auf deren Grundlage die anschließende Bauausführung erfolgen kann. Formal bedeutet die Beendigung der Ausführungsplanung – mit Ausnahme der Prüfung der Unterlagen durch Sachverständige – auch die Fertigstellung der eigentlichen Objektplanung. Am Ende dieses Prozesses ist ein Kostenanschlag zu erstellen, der die Basis für die Vergabe der Bauleistung an einen Bauunternehmer darstellt. Bis zum Nutzungsbeginn des Bauwerks sind nach DIN 18960 im Rahmen eines Nutzungskostenanschlags alle voraussichtlich anfallenden Kosten zusammenzustellen.

Projektphase		Stufen der Baukostenermittlung nach DIN 276-1	Stufen der Nutzungskostenermittlung nach DIN 18960
Bedarfsplanung nach DIN 18205		<i>Kostenrahmen</i> Basis: Qualitative und quantitative Bedarfsangaben	<i>Nutzungskostenrahmen</i> Basis: grundsätzliche Wirtschaftlichkeits- und Finanzierungsüberlegungen
Leistungsphase nach HOAI	1. Grundlagenermittlung	---	---
	2. Vorplanung	<i>Kostenschätzung</i> Basis: Erste zeichnerische Darstellungen und Mengenberechnungen zum Bauwerk, zum Baugrundstück und zur Erschließung	<i>Nutzungskostenschätzung</i> Basis: Ermittlung der Gesamtkosten nach Nutzungskostengruppen bis zur ersten Ebene
	3. Entwurfsplanung	<i>Kostenberechnung</i> Basis: Planungsunterlagen, bestehend aus Detailplänen und Erläuterungen	<i>Nutzungskostenberechnung</i> Basis: Ermittlung der Gesamtkosten nach Nutzungskostengruppen bis zur zweiten Ebene
	4. Genehmigungsplanung	---	---
	5. Ausführungsplanung	---	---
	6. Vorbereitung/ 7. Mitwirkung bei der Vergabe	<i>Kostenanschlag</i> Basis: endgültige, vollständige Ausführungs-, Detail- und Konstruktionszeichnungen, Berechnungen, Erläuterungen zur Bauausführung	---
	8. Objektüberwachung (Bauüberwachung)	<i>Kostenfeststellung</i> Basis: geprüfte Abrechnungsbelege, Erläuterungen	<i>Nutzungskostenanschlag</i> Basis: alle für die Nutzung voraussichtlich anfallenden Kosten

Tabelle 10: Stufen der Bau- und Baunutzungskostenermittlungen in Abhängigkeit von der HOAI-Leistungsphase, nach [53], [54], [50]

Während nach Beendigung der Bauphase die Gesamtsumme der Initialkosten, also die Gesamtaufwendung für Planung und Bau im Zuge der Kostenfeststellung ermittelt wird, ist die Nutzungskostenfeststellung entsprechend DIN 18960 als kontinuierlicher Prozess aufzufassen. Erstmals sollte eine Nutzungskostenfeststellung nach Ablauf einer Rechnungsperiode – zum Beispiel nach einem Jahr – durchgeführt werden. Darauf aufbauende Nutzungsfeststellungen haben bis zu dem endgültigen Ende der Bauwerksnutzung den Charakter von Kostenfortschreibungen.

Abbildung 26 zeigt qualitativ den Zusammenhang zwischen dem Projektfortschritt nach HOAI-Nomenklatur, der Entwicklung der Kostensumme sowie dem Kostenbeeinflussungspotential. Bereits mit Abschluss der Vorplanung hat die Kostenbeeinflussbarkeit signifikant abgenommen, mit Beginn der Bauausführung besitzt sie nur noch einen marginalen Einfluss auf den Kostenverlauf. Werden, wie Untersuchungsergebnisse von Schub und Stark [147] oder der PIARC [135] zeigen, notwendige Entscheidungen in sehr frühen Planungsphasen unterlassen, so sind diese Versäumnisse später meist nur noch unkontrollierbar nachzuholen. Besonders trifft dies für die Ausführungsplanung zu, da hier die Vergaben von Bauleistungen an potentielle Bieter bereits laufen oder schon getätigt sind und Änderungen in den Planungs- und Bedarfsfestlegungen fatale Auswirkungen haben können. Des Weiteren wurden in der Abbildung 26 den einzelnen, zuvor erläuterten Stufen der Kostenermittlung die jeweiligen Planungsphasen zugeordnet. Je nach Ermittlungszeitpunkt weisen diese Kostenprognosen unterschiedlich ausgeprägte Streubreiten auf. Auf die Größenordnungen der Streubreiten wird im Abschnitt 4.4.1 noch einmal konkreter eingegangen.

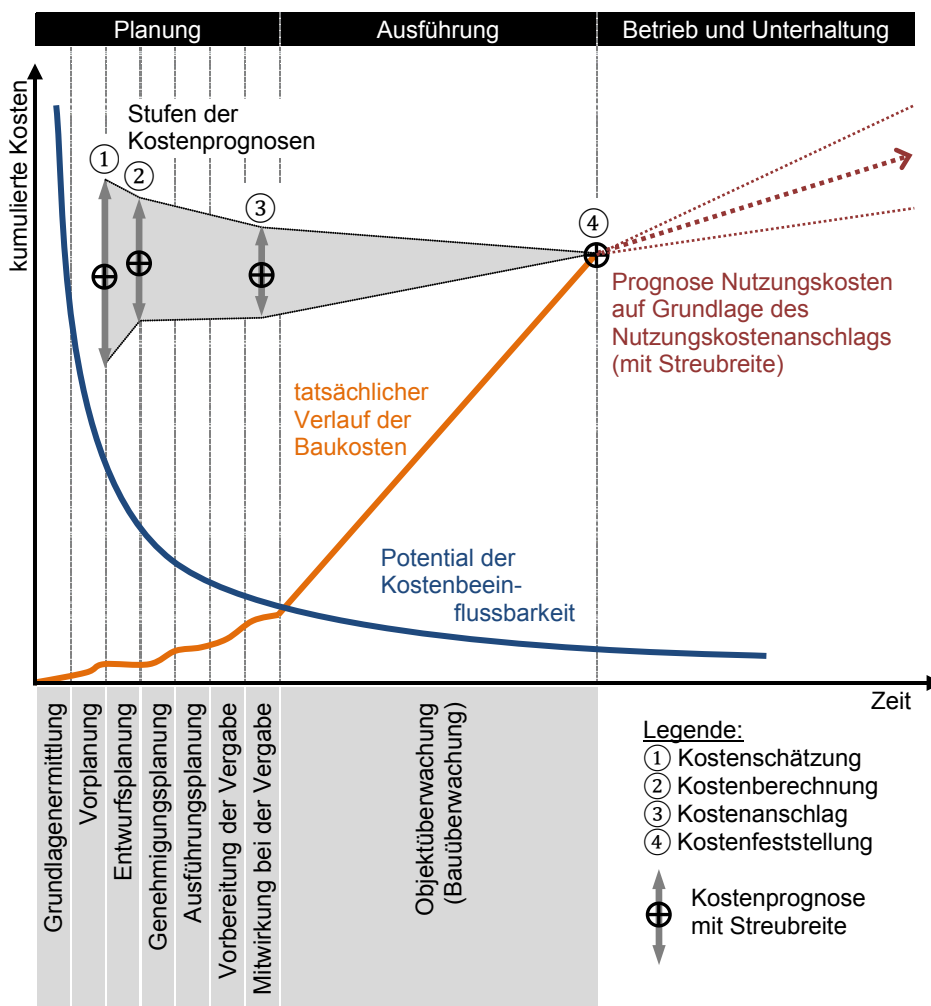


Abbildung 26: Qualitative Kostenverläufe und Kostenbeeinflussbarkeit, modifiziert nach [147]

Während die nach DIN 276-1 beschriebenen Stufen der Kostenermittlung in Abhängigkeit von der jeweiligen HOAI-Leistungsphase „nur“ die reinen Baukosten betrachten, stellt die DIN 18960 den Bezug zu den Nutzungskosten her. Eine direkte Interaktion zwischen der Ermittlung der Bau- und Nutzungskosten ist hingegen nicht erkennbar, so dass insgesamt das Vorgehen zur Kostenermittlung nicht als lebenszykluskostenorientierter Ansatz bezeichnet werden kann.

Die Verknüpfung der Initial- und Folgekosten kann außerhalb der zuvor genannten normativen Vorgaben unter Anwendung des sogenannten Substitutionsprinzips hergestellt werden. In der Volkswirtschaftslehre

versteht man nach Schub und Stark [147] „unter Substitution die Ersetzung eines wirtschaftlichen Gutes durch ein anderes, meist billigeres Gut“. Auch in der Bauökonomie lässt sich das Substitutionsprinzip anwenden und auf vier mögliche Sachverhalte übertragen:

- Fall 1: Initialkosten können durch Initialkosten ersetzt werden,
- Fall 2: Initialkosten können durch Folgekosten ersetzt werden,
- Fall 3: Folgekosten können durch Initialkosten ersetzt werden und
- Fall 4: Folgekosten können durch Folgekosten ersetzt werden.

Der erste Fall kann als der Standardfall der Ingenieurplanung angesehen werden, denn in frühen Bauplanungsphasen werden stets mehrere Ausführungsvarianten untersucht und bewertet. Alle möglichen Varianten weisen unterschiedlich hohe Initialkosten auf und stehen somit im Wettbewerb zueinander. Analog zu Fall 1 lässt sich der vierte Fall wie folgt interpretieren: Steht der alleinige Vergleich der Folgekosten im Vordergrund, handelt es sich hierbei wiederum um die Betrachtung möglicher Ausführungsalternativen. Im Sinne eines „Design to Cost“ Ansatzes – darunter ist die kosteneffiziente Entwicklung eines Bauwerks zu verstehen – stehen indes die Fälle 2 und 3 besonders im Fokus. Die Fälle 2 und 3 reflektieren in besonderem Maße den Lebenszykluskostengedanken, da die Initial- und Folgekosten nicht losgelöst voneinander, sondern miteinander verknüpft betrachtet werden. Sie stellen somit eine konsequente Weiterentwicklung des ersten und vierten Falles dar, da der Entscheidungsprozess nicht mit der separaten Ermittlung von Initial- und Folgekosten endet, sondern eine konsequente Fortführung erfährt. Bereits im Hinblick auf eine spätere Anwendung des Lebenszykluskostenkonzeptes für die Bau- und Betriebsphase von Straßentunneln beinhaltet die Tabelle 11 vier Fallbeispiele für entsprechende Kostensubstitutionen.

	... durch Initialkosten	... durch Folgekosten
Ersatz von Initialkosten...	<p><u>Beispiel zu Fall 1</u> Eine Ausschreibung enthält detaillierte Spezifikationen für einen Innenschalenbeton, der für ein Tunnelbauwerk herzustellen, anzuliefern und am Einbauort abzuladen ist. Der Bauunternehmer vergibt den Auftrag an den Lieferanten, der das günstigste Angebot unterbreitet hat.</p>	<p><u>Beispiel zu Fall 2</u> Für eine außerhalb des Lichtraumprofils im Tunnel zu verlegende Löschwasserleitung wählt der Bauherr nicht eine Rohrleitung aus Edelstahl, sondern einen aus feuerverzinktem Stahl gefertigten Rohrstrang aus. Das verzinkte Rohr ist anschließend mit einem Korrosionsschutz zu versehen, der in regelmäßigen Abständen zu erneuern ist.</p>
Ersatz von Folgekosten...	<p><u>Beispiel zu Fall 3</u> Unter bestimmten hydrogeologischen Voraussetzungen kann es bei einem nicht rundum abgedichteten Tunnel zu teils starken Verkrustungen der Bergwasserdrainage kommen. Zur Entfernung derartiger Ablagerungen kommen meist hohe Spüldrücke, Rütteldüsen oder ggf. Fräsen zum Einsatz. Um einer aufwendigen Sanierung der Drainagestränge vorzubeugen, sind robuste Drainagerohre mit entsprechender Wandstärke vorzusehen.</p>	<p><u>Beispiel zu Fall 4</u> Um die angestrebte Lebenszyklusdauer eines Tunnellüfters zu erreichen, sind regelmäßige Inspektionen und Wartungen bzw. bei Bedarf fachgerechte Instandsetzungen (Reparaturen) durchzuführen. Werden diese Arbeiten unterlassen, kann es dazu kommen, dass ein Tunnellüfter nur unter hohem finanziellem Aufwand erhalten werden kann oder ein frühzeitiger Austausch erforderlich wird.</p>

Tabelle 11: Beispiele für die Anwendung des Substitutionsprinzips

Damit jedoch die Substitution der Initial- und Folgekosten über die Gesamtdauer des Bauwerkslebenszyklus auf einer validen Basis beruht, muss der Bauherr die funktionalen Anforderungen an das Bauwerk frühzeitig so detailliert wie möglich festlegen. Dazu gehört auch, dass beispielsweise bei Immobilien spätere Nutzungswechsel bereits während der Planungsphase Berücksichtigung finden.

Wie aus Abbildung 26 hervorgeht, ist die Beeinflussbarkeit der Folgekosten für bereits in Betrieb gegangene Bauwerke vergleichsweise gering. Diese Aussage hat vor dem Hintergrund Bestand, dass eine notwendige

Ausgabe zu einem bestimmten Zeitpunkt nur um einen geringen Prozentsatz reduziert werden kann. Wird jedoch davon ausgegangen, dass eine spezifische Ausgabe über die lange Betriebsphase periodisch immer wiederkehrt, ist dennoch ein signifikanter Einfluss absehbar. Folgerichtig sollen im nächsten Absatz verschiedene Strategien aufgezeigt werden, wie Folgekosten während der Betriebs- und Unterhaltungsphase beeinflusst werden können.

Betriebs- und Unterhaltungsphase

Der Betrieb eines Bauwerks ist heutzutage eng mit dem Begriff „Facility Management“ (FM) verbunden. Die Disziplin des Facility Managements beinhaltet eine Reihe von Ansätzen, die zu einer Effizienzsteigerung von baulichen Anlagen führt. Nach Definition in der GEFMA-Richtlinie 100-1 [78] bewirkt das Facility Management „die durch ergebnisorientierte Handhabung von Facilities und Services im Rahmen geplanter, gesteuerter und beherrschter Facility Prozesse eine Befriedigung der Grundbedürfnisse von Menschen [...] und die Erhöhung der Kapitalrentabilität“. Es umfasst die „permanente Analyse und Optimierung kostenrelevanter Vorgänge rund um bauliche und technische Anlagen und Einrichtungen“. Konkret bedeutet dies, dass bauliche und anlagentechnische Werte zu erhalten, Nutzungsqualitäten zu erhöhen sowie Nutzungskosten zu reduzieren sind. Das Hauptziel, das mit einem für ein spezifisches Bauwerk zugeschnittenen FM verfolgt wird, ist in Übereinstimmung mit der GEFMA in der Reduzierung der Lebenszykluskosten zu finden.

Ein Rückgriff auf das zuvor erläuterte Substitutionsprinzip macht deutlich, dass dies mit Einschränkung auch aus der Perspektive eines Bauwerksbetreibers anwendbar ist; jedoch ist lediglich die Substitution von Folgekosten nach Fertigstellung und Inbetriebnahme eines Bauwerks möglich. Grundsätzlich können dabei, wie in Abbildung 27 exemplarisch aufgezeigt, mehrere Strategien der Kosteneinsparung verfolgt werden. Der mit A bezeichnete Folgekostenverlauf ist als Unterlassungsvariante anzusehen, d.h. der Betrieb des Bauwerks wird ohne eine Modifikation der Betriebsstrategie weiterverfolgt. Gleichzeitig übernimmt Variante A die Funktion einer Vergleichsbasis und gilt somit als Gradmesser für die im Folgenden beschriebenen Strategien B bis D. Während die in Abbildung 27 mit B und C bezeichneten Strategien davon profitieren, dass zu unterschiedlichen Zeitpunkten in der Betriebs- und Unterhaltungsphase Folgekosten mit sofortiger Wirkung reduziert werden können, so ist mit der Umsetzung der Strategie D eine anfängliche Zusatzinvestition zu erbringen. Können die Strategien B und C zu jedem beliebigen Zeitpunkt der Betriebs- und Unterhaltungsphase zum Einsatz kommen, so ist im Falle der Strategie D vorher zu prüfen, ob über die Restnutzungsdauer infolge der einmaligen Zusatzinvestition überhaupt ein Effizienzgewinn erzielt werden kann.

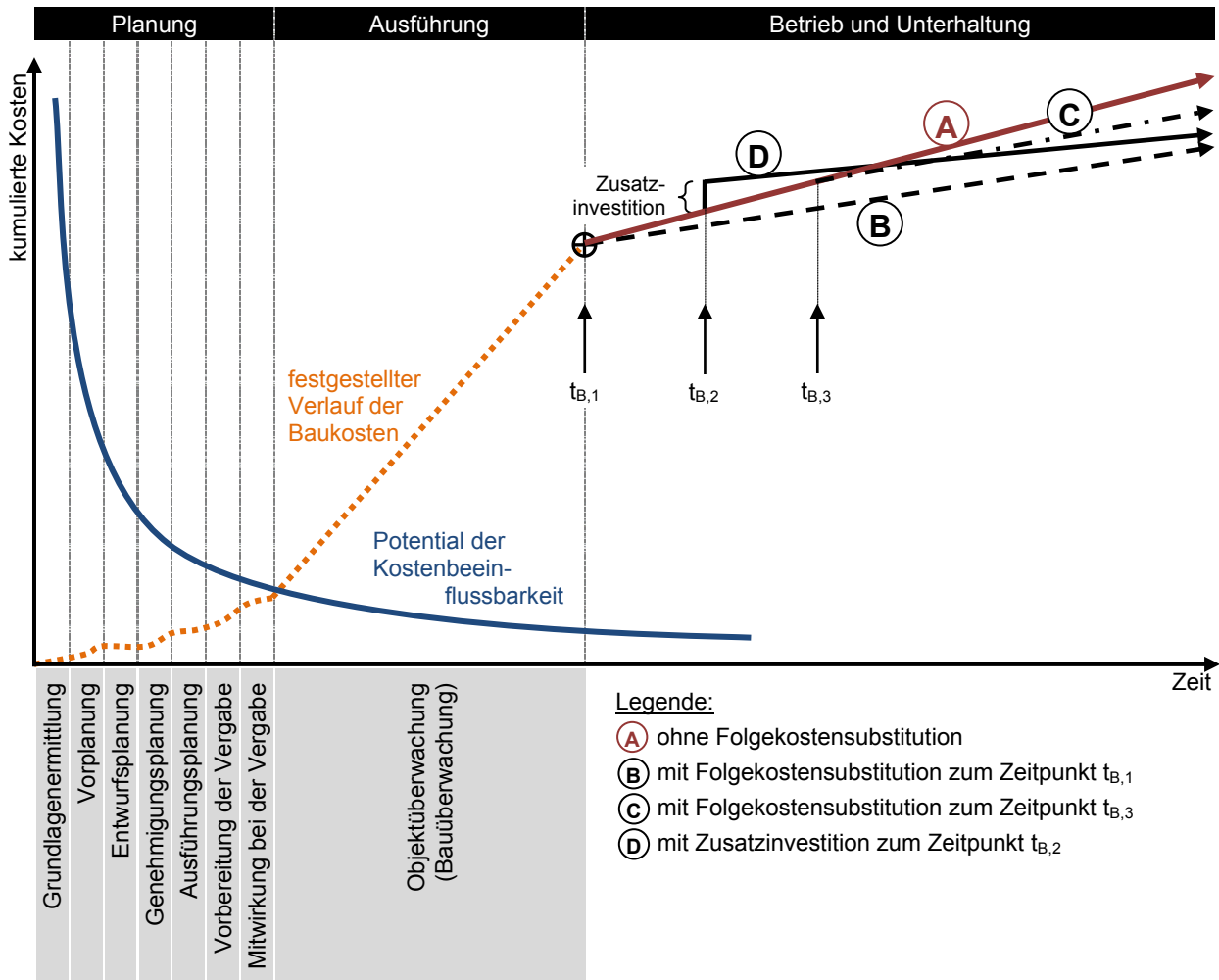


Abbildung 27: Die Substitution von Folge- durch Folgekosten während der Betriebs- und Unterhaltungsphase

Als Beispiele für die Strategien B und C ist ein langfristiges Energy-Contracting, der Neuabschluss von mit dem Bauwerk in Verbindung stehenden Dienstleistungsverträgen oder die Reorganisation von Instandhaltungsmaßnahmen anzuführen. Die Strategie D ist beispielsweise dann denkbar, wenn ein Betreiber die energetische Versorgung eines Bauwerks ab einem spezifischen Zeitpunkt mithilfe von Geothermie- oder Photovoltaikanlagen vorsieht. Des Weiteren können größere bauliche Maßnahmen dazu beitragen, Betrieb und Unterhaltung effizienter zu gestalten.

Anhand eines Beispiels soll abschließend verdeutlicht werden, welche Gefahren mit der Nichtbeachtung von Folgekosten verbunden sein können: Der Verkehrsverbund Rhein-Ruhr mit Sitz in Gelsenkirchen schätzt nach eigenen Angaben [163] die gegenwärtigen Kosten zur Instandhaltung des etwa 30 Jahre alten Stadt- und U-Bahnnetzes auf 2,8 Mrd Euro. Bei der Erneuerung der Betriebstechnik sowie der Tunnel- und Gleisanlagen besteht bei den acht Verkehrsunternehmen, die Stadtbahnlinien im Verbundnetz betreiben, ein Sanierungsstau, der, wenn es nicht zu baldigen Leistungseinschränkungen kommen soll, dringend aufgelöst werden muss. Aus den Schilderungen wird ersichtlich, dass erst die Abschätzung der zu erwartenden Gesamtlebenszykluskosten die Grundlage für eine positive oder negative Investitionsentscheidung hätte darstellen sollen. Anders ausgedrückt hätte anhand einer frühzeitigen Lebenszykluskostenanalyse eine Planung des erforderlichen Folgekostenbedarfs inklusive etwaiger Rückstellungen erfolgen müssen. Da heute auf Grundlage von baulichen Zustandsanalysen der Sanierungsstau aus monetärer Sicht quantifiziert werden kann, ist ein Paradigmenwechsel zur lebenszykluskostenorientierten Sichtweise dringend angeraten.

3.5.5 Potentiale der lebenszykluskostenbasierten Sichtweise

Die Anwendung des Lebenszykluskostenkonzeptes ist grundsätzlich jederzeit möglich, unabhängig davon, ob sich ein Bauwerk im Planungs-, Bau- oder Betriebsprozess befindet. Wie gezeigt wurde, ist das erreichbare Potenzial umso höher, je früher die Entscheidung zugunsten einer lebenszykluskostenbasierenden Sichtweise gewählt wird. In diesem Falle ist von allen Beteiligten ein eindeutiges Bekenntnis erforderlich, zentrale Grundaspekte zu akzeptieren und auch nach ihnen zu handeln. Insbesondere der Bauherr, der Planer, der Bauunternehmer und der spätere Betreiber müssen sich zu einem partnerschaftlichen Dialog bekennen. Dazu gehört, dass Informationen über Schnittstellen hinweg in vollem Umfang weitergegeben und Fehlinterpretationen ausgeschlossen werden. Alle Beteiligten müssen zudem eine identische Zielstellung verfolgen, anderenfalls resultieren aus unterschiedlichen Auffassungen nicht miteinander vereinbare Lösungsansätze.

Im Regelfall ist der Bauherr der Initiator, der die Durchführung eines Projektes auf Grundlage der Lebenszykluskostenbetrachtung vorschlägt. Dazu muss er aber selber die Ansätze der Lebenszykluskostenphilosophie sowie die daraus erwachenden Konsequenzen akzeptieren. Die Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung ist, dass die Zielstellung eindeutig an alle Beteiligten weitergeben werden kann. Tritt ein Bauherr als späterer Bauwerksbetreiber auf, so ist die Bereitschaft, Folgekosten durch Initialkosten zu ersetzen, höher als wenn nach der Bauwerksfertigstellung die Veräußerung geplant ist. Ob insbesondere der Immobilienmarkt das Potential aufweist, mit einer lebenszykluskostenbasierenden Herangehensweise eine höhere Rendite bei der Veräußerung eines Bauwerks zu erzielen, muss aus heutiger Sicht (noch) angezweifelt werden. Denkbar ist hingegen, diese langfristigen Vorteile mit in die Zertifizierung von Bauwerken zu inkludieren. Weltweit sind – wie Herzog in [95] berichtet – innerhalb des letzten Jahrzehnts Gütesiegel zur Zertifizierung nachhaltiger Bauweisen und Bewirtschaftungsstrategien entwickelt und etabliert worden. Der Besitzer eines nachhaltig zertifizierten Gebäudes kann dies als Marketinginstrument einsetzen. Auch die Bewertung der Nachhaltigkeit von Infrastruktureinrichtungen rückt nach Graubner et al. [87] immer mehr in den Fokus der Forschung.

Für den Fall, dass ein Bauwerk auf Grundlage der Lebenszykluskosten geplant und errichtet wird, soll zunächst angenommen werden, dass der Bauherr auch als der spätere Betreiber auftritt. In Bezug auf eine geeignete Vertragsabwicklungsform sollen zwei alternative Möglichkeiten diskutiert werden: zunächst der Einheitspreisvertrag sowie im Anschluss das Partneringmodell. In beiden Fällen ist es erforderlich, eine umfangreiche Vorerkundung des Baufeldes vorzunehmen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die örtlichen Rahmenbedingungen möglichst umfangreich erfasst und realitätsnah eingeschätzt werden. Anhaltspunkte zum erforderlichen Umfang geotechnischer Untersuchungen gibt die DIN EN 1997-1 „Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik“ [60]. Darin findet sich der Hinweis, dass „die Kenntnis der Baugrundverhältnisse vom Umfang und von der Güte der Baugrunduntersuchungen abhängt. Deren Kenntnis und die Überwachung der Bauarbeiten sind im Allgemeinen wichtiger für die Einhaltung der grundsätzlichen Anforderungen als die Genauigkeit der Rechenmodelle und Teilsicherheitsbeiwerte“.

Hat nun der Bauherr mit Hilfe eines Fachplaners auf Grundlage der vorliegenden Informationen eine detaillierte Ausführungsplanung erarbeitet, so wird eine Vergabe der Bauleistung nach dem Einheitspreisvertrag möglich. Dazu erstellt der Planer ein Leistungsverzeichnis, aus welchem die Beschreibung aller Leistungspositionen sowie die erforderlichen Leistungsmengen hervorgehen. Die Ausschreibungsunterlagen umfassen sowohl das Leistungsverzeichnis als auch die geprüfte Ausführungsplanung. Bei der Auswertung der durch die Bieter vorgelegten Angebote sollte der Bauherr Nebenangebote dann unberücksichtigt lassen, wenn die Gefahr besteht, dass von der Ausführungsplanung, die als optimaler Lösungsvorschlag angesehen werden muss, abgewichen wird. Während der Leistungserbringung muss der Bauherr eine Bauüberwachung installieren, die konsequent ihre Aufgaben wahrnimmt und über die Tragweite, die mit der Abweichung von der Ausführungsplanung verbunden ist, sensibilisiert ist.

Als Alternative zum Einheitspreisvertrag soll die Projektabwicklungsform nach dem Partneringmodell betrachtet werden. Beim Partnering wird das Bauwerk unter der Federführung des Bauherrn zusammen mit dem Planer und dem Bauunternehmer entwickelt. Indem jeder Partner seine Kompetenzen in den Planungsprozess einbringt, wird ein eindeutiges Bau-Soll geschaffen. Konsequenterweise aufeinander aufbauende Planungsprozesse tragen unter allen Beteiligten dazu bei Kosten transparent fortzuschreiben. Mit Fertigstellung der Ausführungsplanung liegen ein endgültiger Baupreis sowie eine Folgekostenkalkulation vor. Bereits während der Bauphase sind die prognostizierten Folgekosten fortlaufend zu aktualisieren. Dieser Fortschreibungsprozess ist vergleichbar mit der Erstellung einer Arbeitskalkulation, die vor und während der Bauausführung ständig durch den Bauunternehmer angepasst wird. Während die Arbeitskalkulation das Ziel verfolgt, die Baukosten auf das Bauende zu projizieren, so ist die Prognose der Nutzungskosten pro Abrechnungsperiode Gegenstand der Folgekostenkalkulation.

Wie zuvor erwähnt, hat die Lebenszyklusbetrachtung bei der Abwicklung von Bauaufgaben nach dem Modell der Öffentlich Privaten Partnerschaften (ÖPP) an Bedeutung gewonnen. Im Gegensatz zum Einheitspreisvertrag oder zum Partneringkonzept macht der Bauherr lediglich Vorgaben, die an ein Bauwerk gestellt werden. Die Erarbeitung der Ausführungsplanung liegt in der Hand des Auftragnehmers, der zeitgleich auch für eine vertraglich fixierte Periode der Betreiber des Bauwerks ist. Abgesehen von Aufgaben, die hoheitlich vom Auftraggeber zu erfüllen sind und nicht an den Auftragnehmer vertraglich weiterdelegiert werden können, erhält der Auftragnehmer über eine Dauer von beispielsweise 30 Jahren eine sogenannte Betreiberkonzession, die mit festgelegten Vergütungszahlungen einhergeht. Nach Ablauf der Konzessionsdauer ist das Bauwerk in einem vertraglich festgelegten Zustand an den Bauherrn zurückzugeben. Aus den Schilderungen geht hervor, dass es das ausdrückliche Ziel des Auftragnehmers sein muss, das Bauwerk mit Hilfe des Lebenszykluskostenansatzes zu planen, zu errichten und zu betreiben. Dazu muss bereits beim Vertragsabschluss ersichtlich sein, wie sich die Lebenszykluskosten entwickeln werden. Ein Vertragsabschluss ist erst dann zu empfehlen, wenn sich unter Ansatz der Erlöse über den Gesamtbetrachtungszeitraum ein positiver Lebenszyklus-Erfolg abzeichnet.

Unabhängig davon, nach welcher Vertragsabwicklungsform das Bauwerk geplant und erstellt wird, ist vom Betreiber ab dem Zeitpunkt der Bauwerksinbetriebnahme die Nutzungskostenermittlung weiterzuführen. Dazu sind geeignete Controllinginstrumente einzusetzen, da jede Abweichung von der Prognose offen zu legen und zu begründen ist. In einem nächsten Schritt ist eine Strategie zu entwickeln, wie bei Abweichungen von der Soll-Kostenprognose entgegengesteuert werden kann. Gegenstand eines Controllinginstrumentes ist die vollständige Dokumentation des Bauprozesses. Dazu gehören Produktnachweise, technische Merkblätter zu Anlagen und Einrichtungen sowie eine fehlerfreie Bestandserfassung in elektronisch hinterlegten Konstruktionszeichnungen.

Mit der Verfolgung des Lebenszyklusansatzes ergeben sich Chancen, die dann realisiert werden, wenn alle Projektbeteiligten auf gleicher Augenhöhe agieren und ein gemeinsames Ziel verfolgen. Alle Partner profitieren schließlich von einem Wissenszuwachs, der bei weiteren Projekten Anwendung finden kann. Insbesondere dem Bauunternehmer wird die Möglichkeit eröffnet, seine Geschäftstätigkeit über die Erbringung von Bauleistungen hinaus auszuweiten. Gerade hierin kann der Schlüssel liegen, sich von der Konjunkturanfälligkeit der Baubranche loszulösen. Nicht zuletzt wird ein zufriedener Bauherr einen Partner aufgrund von positiven Erfahrungen beim nächsten Projekt erneut berücksichtigen oder positive Erfahrungen an weitere, potentielle Bauherrn weitergeben.

4 Kriterien für die Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken

4.1 Beschreibung der Ausgangslage

Im Folgenden soll das Konzept der Lebenszykluskosten an die Charakteristiken, die Tunnelbauwerke aufweisen, angepasst werden. Den Ausgangspunkt für eine detaillierte Betrachtung stellt der im dritten Kapitel erläuterte Ansatz zum Bauwerkslebenszyklus dar.

Tunnel – wie die meisten Ingenieurbauwerke – sind Unikate, die über die gesamte Lebenszyklusdauer eine vor Planungsbeginn festgelegte Funktion erfüllen. Dazu wird im Zuge des Planungsprozesses ein Tunnelbauwerk an die örtlich herrschenden Gegebenheiten angepasst. Bahn-, U-Bahn-, Versorgungs- und Straßentunnel unterscheiden sich untereinander bezüglich Größe und Form des Tunnelquerschnitts sowie der betrieblichen und sicherheitstechnischen Ausstattung. Teilweise ist die Erstellung von Nebenbauwerken wie Notausgänge, Ver- und Entsorgungseinrichtungen oder Überwachungsräume erforderlich. Zudem ist die Funktionserfüllung daran geknüpft, dass spezifische Einbauteile, zum Beispiel Signal-, Brandmelde- oder Beleuchtungsanlagen im Tunnel vorhanden sein müssen. Nach PIARC [135] sind moderne Tunnel technische Ingenieursysteme, die mehr Gemeinsamkeiten mit industriellen Anlagen als mit anderen Bauwerken im Straßennetz aufweisen.

Im Hinblick auf Art und Funktion eines Tunnelbauwerks existieren verschiedene Regelwerke, aus denen genaue Vorgaben für die Planungs-, Realisierungs- und Betriebsphase hervorgehen. Beispiele für derartige Regelwerke sind die „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten“ der Bundesanstalt für Straßenwesen [19] (vgl. Abschnitt 2.5.4), die „Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen [72] (vgl. Abschnitt 2.5.6) oder die „Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten“ der Deutschen Bahn AG [44].

Da Tunnel vielfältige Funktionen erfüllen können, ist es an dieser Stelle erforderlich, den Betrachtungsumfang einzuschränken. Die Analyse der Lebenszykluskosten wird daher im Folgenden auf Straßentunnel beschränkt, da sie Teil des Staatsvermögens sind und aus Steuer- oder Nutzereinnahmen finanziert werden. Investitionsentscheidungen und Ausgaben lassen sich damit für die interessierte Öffentlichkeit transparent darzustellen.

Im Gegensatz zu anderen Tunneltypen werden Straßentunnel fast ausschließlich durch motorisierten Individualverkehr und öffentlichen Verkehr, selten auch durch Fahrradfahrer oder Fußgänger genutzt. Es müssen also bestmögliche Rahmenbedingungen vorhanden sein, die einen flüssigen und sicheren Verkehrsfluss in der Tunnelröhre ermöglichen. Dies wird unter anderem dadurch erreicht, dass Fahrzeugführer die Tunnelwandungen so empfinden, dass sie den Verkehrsraum nicht einengen und ein hohes Lichtreflexionsvermögen aufweisen. Damit sich das menschliche Auge ausreichend adaptieren kann, ist eine zeitabhängige und an die in der freien Strecke herrschenden Lichtverhältnisse angepasste Ausleuchtung der Tunnelröhre in der Ein- und Ausfahrtstrecke zu gewährleisten (vgl. Abbildung 10 in Abschnitt 2.5.6). Neben der weitgehend automatischen Steuerung der Tunnelbetriebstechnik muss die Möglichkeit vorhanden sein, dass Operatoren in die Prozesssteuerung eingreifen. Insbesondere für den Fall, dass es zu einem außergewöhnlichen Vorfall im Tunnel kommt, muss eine schnelle und zuverlässige Ereignisdetektion erfolgen und ein koordiniertes Eingreifen von außen ermöglicht werden. Dazu zählt auch, dass sich Verkehrsteilnehmer anhand einer eindeutigen Beschilderung im Tunnel orientieren können; im Notfall müssen Hilfe angefordert und im Falle einer Tunnellevakuierung sichere Bereiche erreicht werden können. Insgesamt wird deutlich, dass neben den baulichen Gegebenheiten bei Straßentunneln den betrieblichen und organisatorischen Abläufen durch die Interaktion von Technik und Mensch ein hohes Maß an Bedeutung zukommt. Die Auswirkungen dieser Bemü-

hungen bleiben nicht ohne finanzielle Folgen und spiegeln letztlich das Sicherheitsbedürfnis einer mobil agierenden Bevölkerung wider.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Lebenszykluskostenanalyse ist auch auf andere Tunnel als Straßentunnel anwendbar. Voraussetzung ist dann jedoch, dass die baulichen und betrieblichen Besonderheiten des zu untersuchenden Tunnelbauwerks identifiziert und für eine spätere Implementierung in die Kostenanalyse vorbereitet werden. Grundsätzlich ist das Vorgehen identisch zu der hier für Straßentunnel aufgezeigten Vorgehensweise.

4.2 Anwendungsvoraussetzungen

4.2.1 Die Verknüpfung der Initial- und Folgekosten in Abhängigkeit vom Projektstatus

Im öffentlichen Bewusstsein werden die Kosten für Tunnelprojekte, die durch die öffentliche Hand finanziert werden, in der Regel mit den Initialkosten gleichgesetzt. Gleichwohl sind für den Bauherrn bzw. den Bauwerksbetreiber auch die Folgekosten, die aus dem langfristigen Betrieb und der Erhaltung der Funktionsfähigkeit hervorgehen, von großem Interesse und im Sinne des Lebenszykluskostenansatzes mit in den Prozess einer Realisierungsentscheidung einzubeziehen.

Einige wichtige, in Abhängigkeit zueinander stehende Einflussgrößen für Straßentunnelvorhaben sind – wie bei Vogt und Thewes [164] diskutiert – in Abbildung 28 enthalten. Während einzelne Einflussgrößen nur getrennte Auswirkungen auf Initial- oder Folgekosten ausüben, wirken sich andere Einflüsse sowohl auf die Initial- als auch auf die Folgekosten aus. Stehen die Planungen für ein Projekt ganz am Anfang, so ist auf Grundlage des in Abschnitt 3.5.4 diskutierten Substitutionsprinzips für einzelne Einflussgrößen eine Abwägung zwischen Initial- und Folgekosten vorzunehmen. Befindet sich das Projekt hingegen in einer fortgeschrittenen Phase, so sind die gegenseitigen Abhängigkeiten in der Regel nur noch im Bereich des Tunnelbetriebs, der Instandsetzung und der Instandhaltung festzustellen; die übrigen Abhängigkeiten sind als unveränderlich anzusehen. Die erörterten wechselseitigen Abhängigkeiten werden in Abbildung 28 anhand von Pfeilbeziehungen verdeutlicht. Die farbliche Unterscheidung der Pfeile zeigt an, ob Abhängigkeiten nur bei der Neuplanung (orange) oder auch für Bestandsprojekte (blau) relevant sind. Ein in Halbkreisform ausgebildeter Pfeil ist ein Indikator dafür, dass die innerhalb eines Blocks aufgeführten Einflussgrößen Potential für etwaige Substitutionen untereinander aufweisen.

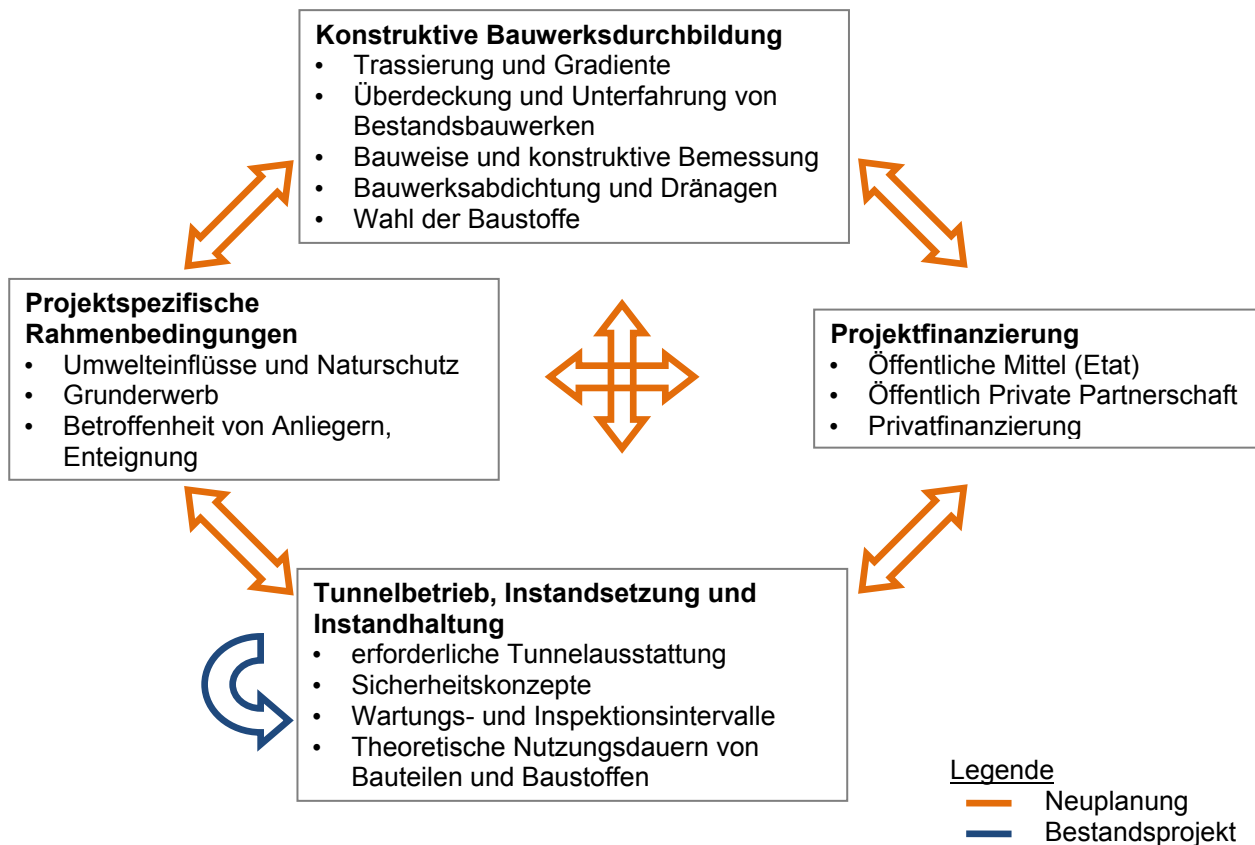


Abbildung 28: Wechselseitige Abhängigkeiten bei Tunnelprojekten

Bevor eine Realisierungsentscheidung getroffen wird, sind infrastrukturelle Bauvorhaben einer standardisierten Kosten- und Nutzenrechnung zu unterziehen. Auf diese Weise können Aspekte, die mit der Projektdurchführung in Verbindung stehen, evaluiert werden. Für ein Straßentunnelprojekt sind dies zum Beispiel volkswirtschaftliche Kosten, die sich aus Fahrzeitverkürzungen oder aus der Optimierung von Warenströmen ergeben. Aber auch Auswirkungen auf das unmittelbare Umfeld, wie Gefahren für Umwelt, Anwohner und Bauwerksnutzer sind hierbei zu berücksichtigen. Zusammenfassend gehen diese Einflüsse in eine Nutzen-Kosten-Analyse ein, aus der ein projektspezifisches Nutzen-Kosten-Verhältnis abgeleitet werden kann. Der anfänglichen Investition – also den Initialkosten zur Planung und Erstellung eines Tunnelbauwerks – werden dabei gemäß dem Bericht zur Bundesverkehrswegeplanung [27] die mit der Investition verbundenen Wirkungen gegenübergestellt. Die Wirkungen stellen einen positiven bzw. negativen Nutzen dar und werden mit Hilfe von monetären Größen ausgedrückt. Die monetären Wirkungen sollen gegen die Lebenszykluskosten abgegrenzt und im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. Häufig werden die monetarisierten Wirkungen als indirekte Kosten aufgefasst. Nach Definition von Gilchrist und Allouche handelt es sich bei den indirekten um „soziale“ Kosten, die von den Autoren in [80] auf insgesamt 22 Indikatoren zurückgeführt werden. Im Gegensatz dazu werden Lebenszykluskosten als direkte Kosten bezeichnet; sie gehen zulasten der Kostenstellen, die dem Bau und dem Betrieb des Tunnelbauwerks zugeordnet sind.

4.2.2 Einstiegs-Szenarien

Das recht kurze Zeitalter des Straßentunnelbaus in Deutschland bietet nur einen begrenzten Rahmen, Interpretationen bezüglich der zu erwartenden Dauerhaftigkeit und Nutzungsdauer von Straßentunneln anzustellen. Anders stellt sich die Situation im Bahntunnelbau dar. Wie Breidenstein [13] anhand mehrerer Beispiele aus dem Schienennetz der Deutschen Bahn zeigt, kann die Lebensdauer eines Bahntunnels die Größenordnung eines Jahrhunderts erreichen, bevor eine umfassende Sanierung des Tragwerks notwendig wird.

Entsprechende Regelwerke für den Straßentunnelbau führen Nutzungsdauern in der Größenordnung eines Jahrhunderts auf und bestätigen somit indirekt die im Bahntunnelbau gemachten Erfahrungen. Wird ein Tunnel im Zuge einer umfangreichen Instandhaltungsmaßnahme nach vielen Jahrzehnten des Betriebs mit einer neuen Innenschale ausgerüstet, so kann dieser Tunnel nach der Fertigstellung der Arbeiten – die mit einer Anpassung an die aktuelle Regelwerkslage verbunden sind – als gleichwertig zu einem Tunnelneubau angesehen werden. Jedoch fallen Vortriebskosten und Aufwendungen zum Grundstückserwerb in diesem Falle nicht mehr an. Als Konsequenz einer umfangreichen Instandhaltungsmaßnahme verlängert sich die gesamte Lebenszyklusdauer um eine ganze Periode.

Diese Überlegungen lassen die Schlussfolgerung zu, dass Tunnelkonstruktionen ein beträchtliches Potenzial aufweisen, die Tunnelnutzungsdauer infolge einer umfangreichen Instandhaltungsmaßnahme zeitlich zu verlängern. Es ist davon auszugehen, dass der Kapitalwert für eine große Instandhaltungsmaßnahme im Sinne einer Generalsanierung bezogen auf das Fertigstellungsjahr deutlich unter den Kosten liegt, die absolut für die Ersterstellung des Bauwerks angefallen sind. Mutmaßlich ist das Verhältnis zwischen den kapitalisierten Instandhaltungskosten und den Initialkosten bei anderen Bauwerken wie Brücken, Industriegebäuden oder Immobilien ungünstiger als bei Tunnelbauwerken. Diese Einschätzung basiert auf der Annahme, dass die kostenintensive Herstellung des Hohlraums nicht erneut auszuführen ist, im Falle einer Brücke oder einer Immobilie jedoch das gesamte Tragwerk zu erneuern oder konstruktiv zu verstärken ist.

In Abhängigkeit von der Phase, in der sich ein Tunnelprojekt befindet, ergeben sich, wie von Thewes und Vogt [157] beschrieben, verschiedene Ausgangslagen, aus denen Einstiegs-Szenarien in die Lebenszykluskostenanalyse für einen Straßentunnel abgeleitet werden können:

- **Neubau** – Die Planungsphase besitzt, wie in Abschnitt 3.5.4 erörtert, einen signifikanten Stellenwert, Effizienzpotentiale zu realisieren. Hier kommt es nicht nur darauf an, die geeignete Bauverfahrenstechnik zur Erstellung des Tunnelbauwerks auszuwählen, sondern auch über die Bauphase hinaus die Betriebs- und turnusmäßig anfallenden Instandhaltungskosten in den Fokus zu rücken und alternative Lösungsmöglichkeiten gegeneinander abzuwägen.
- **Bestandserhaltung** – Bei einem Bestandsbauwerk liegt das Hauptaugenmerk darauf, Betriebs- und Instandhaltungskosten in einem Lebenszyklusmodell abzubilden. Eine wichtige Datengrundlage stellt die Kostenhistorie dar, da sie ein sehr detailliertes Bild der bisherigen, für das Bauwerk erfolgten Ausgaben widerspiegelt. Der potentielle, jedoch mutmaßlich beschränkte Rahmen, Planungsentscheidungen, die in der Vergangenheit getroffen wurden, im Sinne eines Lebenszyklusansatzes zu korrigieren, ist durch Kosten-Nutzen-Untersuchungen zu verifizieren.
- **Umnutzung** – Auch für den Fall, dass ein Tunnelbauwerk eine Umnutzung erfahren soll, ist ein Philosophiewechsel zugunsten der Lebenszykluskostenanalyse anzustreben. Denkbare Szenarien sind die Umwandlung eines Straßen- in einen Eisenbahntunnel oder die Nutzung eines Tunnels als Hochwasserretentionsraum. Für diese zweifelsohne sehr speziellen Anwendungsfälle sind vertiefte wirtschaftliche Betrachtungen unerlässlich. Die Umnutzung eines Tunnels war jedoch in der Vergangenheit nur in einigen wenigen Einzelfällen von Bedeutung. Beispielsweise ist der im Jahr 1937 eröffnete 6.872 Meter lange Maurice Lemaire Eisenbahntunnel in Frankreich – wie Bouvier [11] darlegt – im Jahr 1976 nach Umbauarbeiten in das überregionale Straßennetz integriert worden.

Die drei beschriebenen Einstiegs-Szenarien lassen sich, wie in Tabelle 12 zusammengefasst, ferner danach untergliedern, aus welchen Blickwinkeln Gründe für einen Einstieg in eine Lebenszykluskostenanalyse bestehen und welche Zielstellungen damit langfristig verfolgt werden.

Zielgruppen der Lebenszyklusbetrachtung für Straßentunnel sind einerseits die öffentliche Hand, da ihnen die Bauherrn- und Betreiberfunktion zukommt, andererseits Anbieter von Leistungen, die in Öffentlich Private Partnerschaftsmodelle involviert sind. Insbesondere beim zuletzt genannten Adressaten besteht die Herausforderung bereits während der Bieterphase darin, eine die Phasen Planung, Bau und Unterhaltung abde-

ckende Kalkulation über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten abzubilden. Eine derartige Kalkulation setzt fundiertes technisches und betriebswirtschaftliches Sachverständnis voraus und bedingt ein detailliertes Controlling über die gesamte Laufzeit der vereinten Partnerschaft.

Wie auch aus Tabelle 12 ersichtlich wird, ist es sowohl für die öffentliche Hand als auch für den privaten Partner im Rahmen von ÖPP-Projekten denkbar, die Lebenszyklusanalyse zu verschiedenen Zeitpunkten zu beginnen: Ist das zu erwartende Lebenszykluspotential im Falle des Tunnelneubaus am größten (Szenario 1 in Tabelle 12), so bietet sich aber auch auf Basis der Erfahrungen, die mit Betrieb und Unterhaltung eines bestimmten Tunnelbauwerks in der Vergangenheit gemacht wurden, ein Philosophiewechsel an. Dieser erfolgt seitens der öffentlichen Hand unter Einbeziehung der Betriebshistorie (Szenario 2.1). Aus den dokumentierten Kosten- und Lebensdauerdaten zu Bauteilen und Baustoffen lassen sich Einsparpotenziale zielgerichtet ableiten. Diese Überlegung beinhaltet die in Abschnitt 3.5.4 beschriebene Substitution von Folgekosten durch Folgekosten. Auch ist das Szenario 2.2 denkbar, welches davon ausgeht, dass die Vergabe einer Streckenkonzession im Rahmen eines ÖPP-Projektes ein Bestandstunnelbauwerk beinhaltet. In diesem Fall ist der private Partner derjenige, der die Lebenszyklusbetrachtung durchführt. Vorgaben für die Dokumentation von Betriebsdaten bei Straßentunneln können den Ausführungen der PIARC [135] entnommen werden.

Das dritte Szenario kommt für Straßentunnel bisher nur selten zur Anwendung. Sollten jedoch Umnutzung bzw. Verwertung eines Tunnels in Betracht gezogen werden, zeichnet sich ein komplexer Untersuchungsumfang ab, da die geschilderten Einzelszenarien 3.1 bis 3.4 unterschiedliche, nicht direkt miteinander vergleichbare Strategien verfolgen. Aus diesem Grunde wird das dritte Szenario in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Szenario	1. Neubau	2. Bestandserhaltung	3. Umnutzung/Verwertung
Blickwinkel	1.1 Öffentliche Hand 1.2 Öffentlich-Private Partnerschaft (ÖPP) 1.3 Privater Investor (i.d.R. außerhalb des öffentlichen Raumes, bspw. auf Betriebsgelände)	2.1 Philosophiewechsel bei der Öffentlichen Hand 2.2 Ausgliederung eines Tunnelbauwerks in ein ÖPP-Projekt 2.3 Sich abzeichnender Sanierungsbedarf (Generalsanierung)	3.1 Funktionsumwandlung 3.2 Außerbetriebnahme 3.3 Rückbau 3.4 Verkauf
Zielstellung	Realisierungsvariante mit dem höchsten Effizienzgrad ermitteln!	Aufwand für Unterhaltung effizienter gestalten → Einsparpotenziale auf Grundlage von Erfahrungen realisieren!	Lang- bzw. kurzfristige Strategieentscheidung herbeiführen!

Tabelle 12: Die drei Einstiegs-Szenarien der Lebenszykluskostenanalyse

Der Lebenszyklus eines Tunnelbauwerks wird, wie in Tabelle 13 aufgeführt, durch eine Vielzahl von Parametern beeinflusst. Zu unterscheiden ist dabei einerseits zwischen Einflüssen, die bereits während der Planungsphase bekannt sind, andererseits wirken externe, vorab nicht quantifizierbare und zum Teil unbekannt Einflüsse auf das Bauwerk ein. Alle Einflüsse vereint die Tatsache, dass sie sich direkt auf den Lebenszyklus und somit auf die Initial- und Folgekosten des betrachteten Tunnels auswirken. Beherrschbare Einflüsse sind Einwirkungen, die aus Geologie und Hydrogeologie resultieren und die Grundlage der statischen Dimensionierung des Tragwerks bilden. Besondere, und somit nicht vorhersehbare Ereignisse in Tunnelbauwerken stellen Unfälle, Naturgefahren oder Terroranschläge dar, wie sie von Thewes und Heimbecher [154] beschrieben werden.

Straßentunnel mit Betriebsausstattung		
<u>Tragwerk</u>	<u>Betriebstechnische Komponenten</u>	<u>Externe Einflüsse</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Stahl- oder Stahlfaserbeton • Sonderkonstruktionen aus anderen Werkstoffen • Fahrbahnaufbau • Speicherbecken und Dränagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieversorgung • Leittechnik • Sicherheitstechnik • Kommunikationstechnik • Überwachungstechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Geologie • Hydrogeologie • Unvorhersehbare Ereignisse wie Unfälle, Naturgefahren, Terror • Regelwerksänderungen bzw. -anpassungen

Tabelle 13: Faktoren, die den Lebenszyklus von Straßentunneln beeinflussen

Die Beschreibung des Lebenszyklus von Tunnelbauwerken im Analysemodell stellt den Planungsingenieur, der sich in enger Abstimmung mit dem Bauherrn bzw. dem Betreiber befinden muss, vor einige praktische Probleme: Es sind verlässliche Daten zur Ermittlung von Betriebskosten vorzugeben und die Art der Kostenfortschreibung über einen sehr langen Prognosehorizont ist festzulegen. Faktoren, wie die Anpassungen technischer Regelwerke, können zudem Kosten verursachen, die zum Zeitpunkt der Lebenszykluskostenbetrachtung nicht oder nur ansatzweise quantifiziert werden können. Änderungen in der Fiskal- und Zinspolitik sowie die Entwicklung der Inflationsrate sind in der Regel nur auf Grundlage von in der Vergangenheit dokumentierten Daten abschätzbar. Ebenso unterliegen Baustoff-, Energie- und Personalkosten Preissteigerungen, die sich unabhängig voneinander entwickeln.

Um einen Lösungsansatz aufzuzeigen, werden im Folgenden die für Straßentunnelprojekte charakteristischen und aufeinander aufbauenden Lebenszyklusphasen einer detaillierten Betrachtung unterzogen. In Analogie zum allgemeinen Bauwerkslebenszykluskonzept (Abschnitt 3.3.2) erstrecken sich diese Phasen von der ersten konkreten Projektidee über Planung, Bau, Betrieb und Unterhaltung bis zur endgültigen Verwertung. Die phasenspezifische Erläuterung verfolgt das Ziel, die Kosten sowie deren Auswirkungen auf die Gesamtsumme der Lebenszykluskosten transparent herzuleiten.

4.3 Die Identifizierung von Kostenverursachern auf Baustoff- und Bauteilebene

4.3.1 Erläuterung der gewählten Systematik

Die Basis für die Identifizierung von Kosten bilden die bei einem Straßentunnelprojekt zur Ausführung kommenden Baustoffe und Bauteile. Neben den Initialkosten, die mit der Errichtung eines Straßentunnels im Zusammenhang stehen, erwachsen ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme weitere Kosten, die Folgekosten. Diese umfassen sämtliche Betriebsaufwendungen, hierzu zählen die Bereitstellung von Energie sowie weiterer Betriebsstoffe, die Durchführung von Inspektions- und Wartungsarbeiten und darüber hinaus der Austausch von Baustoffen oder Bauteilen. Ein Baustoff oder Bauteil ist dann auszutauschen, wenn eine Instandsetzung unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht mehr gegeben ist und das Lebenszyklusende, welches den Zeitrahmen für das gesamte Projekt markiert, noch nicht erreicht wurde.

Wie in Abschnitt 3.5.4 erörtert, ist das Potenzial zur Kostenbeeinflussbarkeit in einer sehr frühen Projektphase sehr viel ausgeprägter als in einer späteren Phase. Diese Feststellung drückt implizit aus, dass in einer frühen Phase auf Grundlage der vorliegenden Informationslage geeignete Planungsentscheidungen zu treffen sind. Diese frühen Entscheidungen führen dazu, dass sich das Potenzial für die Kostenbeeinflussbarkeit einerseits weiter einschränkt, andererseits alle später zu treffenden Entscheidungen sehr viel mehr Abhängigkeiten zu bereits früher getroffenen Entscheidungen aufweisen.

Das Vorgehen bei der lebenszykluskostenorientierten Planung von Straßentunneln wird umfänglich in den Abschnitten 4.3.2 bis 4.3.4 erläutert und setzt sich aus den folgenden Schritten zusammen:

- Ermittlung der projektspezifischen inneren und äußeren Randbedingungen sowie deren anschließende Zusammenführung,
- Herleitung der aus den inneren und äußeren Randbedingungen resultierenden Parameter, die sich auf die statische Dimensionierung des Tunneltragwerks auswirken,
- Analyse der im Straßentunnelbau zur Anwendung kommenden Baustoffe im Hinblick auf Zusammensetzung, Funktions-, Abnutzungs- und Instandsetzungseigenschaften,
- Beschreibung der Auswirkungen auf das Baustoffverhalten infolge bauwerksspezifischer Einwirkungen,
- Zusammenstellung der Bauteile und Betriebskomponenten, die in einem Straßentunnel zur Anwendung kommen.

Das schrittweise Vorgehen verfolgt die Zielstellung, Bauteile und Betriebskomponenten eines Straßentunnels vor dem Hintergrund zu beurteilen, wie sich die Folgekosten nach der Ersterstellung bzw. -installation in Abhängigkeit von der Zeit entwickeln. Ferner werden die Voraussetzungen für eine anschließende Lebenszykluskostenanalyse geschaffen und der Vergleich zwischen alternativen Planungsentwürfen ermöglicht. Der Prozess folgt der Leitlinie, dass im Sinne einer Lebenszyklusplanung die richtungsweisenden Entscheidungen in der Planungsphase getroffen werden, deren monetäre Auswirkungen sich im direkten Vergleich zu alternativen Planungsentwürfen zu einem kleineren Teil in der Planungs- und Bauphase aber zu einem größeren Teil erst in der Betriebs- und Unterhaltungsphase widerspiegeln.

4.3.2 Innere und äußere Randbedingungen des Planungsprozesses

Die Ermittlung der optimalen Bauwerksausprägung für einen Straßentunnel setzt voraus, dass der Bauherr zunächst aus verkehrlicher Sicht eine umfassende und bedarfsgerechte Grundlagenermittlung durchführt. Unabhängig davon, ob der Straßentunnel in offener oder geschlossener Bauweise errichtet wird, umfasst eine Grundlagenermittlung die folgenden Kernaspekte:

- Bedeutungsklasse des betrachteten Streckenabschnitts,
- das heutige und zukünftige prognostizierte Verkehrsaufkommen, insbesondere auch im Hinblick auf die Entwicklung des Schwerlastverkehrs,
- zeitlicher Planungshorizont,
- weitere strategische Aspekte und Ziele.

Im Anschluss an die Ermittlung der projektspezifischen Kernaspekte ist der Planer in der Lage, die im Rahmen dieser Arbeit als innere und äußere Randbedingungen bezeichneten Aspekte sukzessive zu fixieren. Holst [100] schlägt vor, diese Entscheidungen durch eine Gruppe von Experten, der Tunnel Design and Safety Consultation Group (TDSCG), begleiten zu lassen. Auch im weiteren Projektverlauf soll dieses Expertenforum die betrieblichen Anforderungen mit den einzelnen Planungsstufen abgleichen.

Wie in Abbildung 29 veranschaulicht, betreffen die inneren Randbedingungen sämtliche Einflüsse und Belastungen, die in der Tunnelröhre durch fließenden Verkehr, technische Ausrüstungsgegenstände und sonstige Ereignisse hervorgerufen werden. Im Gegensatz dazu umfassen die äußeren Randbedingungen diejenigen Belastungen, die von außerhalb auf das Bauwerk einwirken. Per Definition handelt es sich dann um eine äußere Randbedingung, wenn aus ihr örtliche oder über die gesamte Bauwerkslänge wirkende Konsequenzen für die Gestaltung oder Bauausführung des Tunnelbauwerks abzuleiten sind.

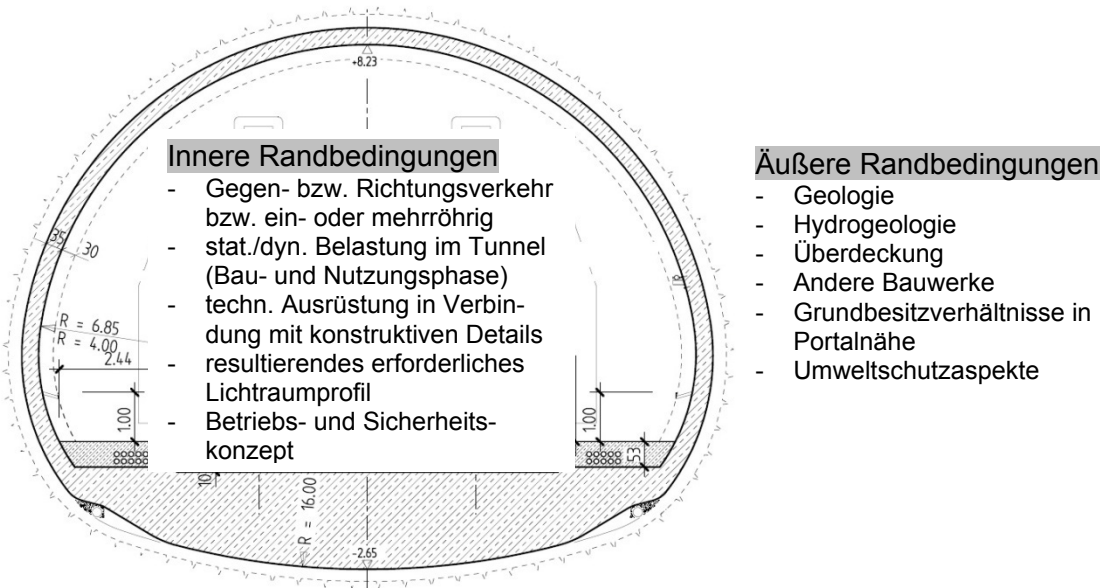


Abbildung 29: Innere und äußere Randbedingungen bei der Planung von Straßentunneln

Üblicherweise untersucht der Bauherr zunächst die inneren Randbedingungen, bevor die Sphäre der äußeren Randbedingungen sondiert und die optimale Tunneltrasse bestimmt wird. Diese logische Abfolge soll beibehalten werden, so dass zunächst die inneren Randbedingungen in den Fokus rücken. Zu Beginn steht die Festlegung, ob es sich um einen Gegenverkehrs- oder Richtungsverkehrstunnel bzw. um eine Lösung mit einer oder mehreren Tunnelröhren handelt. Im Anschluss daran ist gemäß des Heftes 785: „Straßenquerschnitt in Tunneln“ [36] der geeignete Tunnel-Regelquerschnitt auszuwählen sowie über die Erfordernis eines Standstreifens bzw. der alternativen Anordnung von Pannenbuchten zu entscheiden. Mehrere mögliche Lüftungs- und Beleuchtungsentwürfe sowie Betriebs- und Sicherheitskonzepte sind anschließend auszuarbeiten. Bei der Dimensionierung der Tunnelinnenschale ist nach dauerhaft und kurzzeitig einwirkenden statischen und dynamischen Lasten zu unterscheiden. Zu diesen Belastungen gehört zum Beispiel die Einleitung von Kräften und Biegemomenten über Befestigungskonsolen oder Podeste. Gegebenenfalls sind in der Innenschale zusätzliche Nischen zum Einbau von Betriebstechnik oder Beschilderungen zu berücksichtigen.

Die Einwirkung dynamischer und statischer Größen ist zusammenfassend danach zu kategorisieren, ob sie dauerhaft oder kurzzeitig wirken. Während dauerhafte Belastungen durch technische Ausrüstungsgegenstände oder durch Verkehrslasten hervorgerufen werden, sind Lasten aus Bauzuständen als kurzzeitige Belastungszustände anzusehen. Nach Fertigstellung des Bauwerks können weitere kurzzeitige Belastungen wie beispielweise Fahrzeuganprall, Brandeinwirkungen oder Explosionslasten auf das Bauwerk einwirken. Die Bauwerksdimensionierung im Hinblick auf die drei zuletzt genannten Einwirkungen ist in der Regel von der Kritikalität des Tunnelbauwerks abhängig. Die Kritikalität drückt den Grad der Exponiertheit eines Tunnels gegenüber terroristischen Handlungen oder Großunfällen aus. Einzelheiten hierzu gehen aus einem Bericht zum Forschungsprojekt SKRIBT [162] hervor. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass der umfassende Schutz eines Tunnelbauwerks insbesondere bei Explosionsbelastung zu einer äußerst unwirtschaftlichen Dimensionierung führt. Vielmehr steht die Tatsache im Vordergrund, dass sich Tunnelnutzer – sollte es trotz der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit zu einem Explosionsereignis kommen – aus eigenem Antrieb in Sicherheit bringen können. Es ist davon auszugehen, dass im Anschluss umfangreiche Instandsetzungsarbeiten erforderlich werden, die in der Regel eine Sperrung des Tunnels bis zum Abschluss der Arbeiten notwendig machen.

Der nächste Schritt wendet sich den äußeren Randbedingungen zu. Geologie und Hydrogeologie üben zum einen erheblichen Einfluss auf das zur Anwendung kommende Tunnelbauverfahren aus, zum anderen werden durch sie die Art und die statische Dimensionierung der Tunnelauskleidung determiniert. Angaben zu Gebirgslasten und Wasserdrücken, die auf die Tunnelschale einwirken, sind dem Baugrundgutachten zu entnehmen. Inhalt des Baugrundgutachtens ist es, den Umfang vorab erfolgter Untersuchungskampagnen wiederzugeben, die gewonnenen Ergebnisse unter Applikation boden- und gebirgsmechanischer Verfahren zu interpretieren und Kennwerte für eine anschließende geotechnische Berechnung vorzugeben. Zudem enthält das Baugrundgutachten meist bauverfahrenstechnische Empfehlungen, etwa zur Abbaubarkeit der zu durchörternden oder auszuhebenden geologischen Formationen. Bei der geschlossenen Bauweise stellen die Deponierbarkeit des Ausbruchmaterials, bei der offenen Bauweise die Einbaubarkeit von Bodenmaterial zur Hinterfüllung und Überschüttung wichtige Aspekte dar. Nach Auswahl geeigneter Tunneltrassen sind die erforderlichen baulichen Hilfsmaßnahmen zu erarbeiten und zu bewerten. Beispielsweise sind im Zuge der Unterfahrung bestehender Bauwerke oder in Bereichen mit einer geringen Firstüberdeckung Baugrundverbesserungen, Ballastierungen oder die Absenkung des Grundwassers erforderlich.

Weitere äußere Randbedingungen stellen die Grundbesitzverhältnisse dar, die in Bereichen von Portalen, Notausgangsbauwerken oder sonstigen an der Erdoberfläche anzuordnenden betriebstechnischen Anlagen vorliegen. Eng damit verknüpft sind auch Aspekte, die die Umwelt oder die Interessen von Anwohnern betreffen. Die Ausbreitung von Lärm, Abgas und Erschütterungen sind für die Bau- und für die spätere Betriebsphase zu analysieren und durch ein geeignetes Design soweit einzudämmen, dass geforderte Grenzwerte eingehalten werden.

Während die inneren Randbedingungen stets nach Abschluss der ersten HOAI-Leistungsphase – der Grundlagenplanung – als unveränderlich zu betrachten sind, unterliegen die äußeren Randbedingungen einem Entwicklungsprozess. Wie zuvor erläutert, enthält das Baugrundgutachten Informationen zu Geologie und Hydrogeologie, so dass die für die statische Dimensionierung heranzuziehende äußere Belastung, die Abdichtungssystematik sowie ein geeignetes Tunnelbauverfahren festzulegen sind. Die Konfiguration des Tunnelbauwerks – und hierbei ist auch der Prozess der Bauwerkserstellung mit einzubeziehen – besitzt diverse Berührungspunkte mit geltenden Rechtsvorschriften, exemplarisch seien das Berg-, Wasser- und Sicherheitsrecht angeführt. Aufgrund der großräumigen Signifikanz, die mit der Planung eines Straßentunnels einhergeht – vgl. Abschnitt 3.3.1 – ist es zwingend erforderlich, ein Planfeststellungsverfahren durchzuführen. In diesen Feststellungsprozess werden alle Fachbehörden, bei denen ein sachlicher Bezug zum Bauprojekt hergestellt werden kann, mit einbezogen. Die fachlichen Konsultationen zwischen den Fachbehörden und dem Planer enden mit der Erbringung der fünften HOAI-Leistungsphase – der Ausführungsplanung. Am Ende dieser Phase liegt eine zur Ausführung freigegebene Planung vor, die Berechnungen, Erläuterungen und Plandarstellungen beinhaltet.

Sowohl aus den Inhalten der Abbildung 29 als auch aus den bisher erfolgten Beschreibungen ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass im Zuge der statischen Dimensionierung der Tunnelauskleidung innere und äußere Randbedingungen miteinander zu verknüpfen sind. Neben den statischen und dynamischen Belastungen müssen insbesondere bei der Wahl der Baustoffe weitere Einflüsse, die aus Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen sowie aus Schadstoffbelastungen hervorgehen, mit einbezogen werden. Kennzeichnend für diese Einwirkungen ist, dass sie intermodal sind und sowohl als innere wie auch als äußere Randbedingungen aufgefasst werden. Die intermodalen Randbedingungen werden nachfolgend weiter konkretisiert.

Gebirgsseitig ist die Tunnelinnenschale in der Regel einer konstanten Temperatur ausgesetzt. Unabhängig davon, ob der Tunnel ober- oder unterhalb des Grundwasserspiegels liegt, ist über das ganze Jahr nach Richter [140] in den für den Tunnelbau relevanten Teufen von einer mittleren Temperatur von etwa 10°C auszugehen. Im Inneren des Tunnels kann es aber in Abhängigkeit vom Standort zu nennenswerten jahres-

zeitlichen Temperaturdifferenzen kommen. Gemäß Teil 5 „Tunnelbau“ der ZTV-ING [19] ist im Portalbereich im Sommer mit einer maximalen Temperatur von 35°C auf Bauteiloberflächen, im Winter mit -25°C zu rechnen. Beträgt die ab dem Portal gemessene Tunnelstrecke weniger als ein Kilometer, so sind Bauteile auf sommerliche Temperaturen von 25°C und auf winterliche Temperaturen von -15°C zu bemessen. Bei Entfernungen, die über ein Kilometer hinausgehen, sind 25°C im Sommer und -10°C im Winter anzunehmen. Für den ungünstigsten Fall lässt sich aus den Bemessungsgrößen für die Betonschale eine Temperaturdifferenz zwischen dem Tunnelinneren und der gebirgsseitigen Oberfläche von 35 K ableiten; diese Differenz baut sich über die Bauteildicke ab. Die maximale Temperaturdifferenz von 60 K wirkt auf Bauteiloberflächen im Portalbereich ein und weist eine Bandbreite von -25 im Winter bis +35°C im Sommer auf.

Warme Luftmassen, die ein großes Volumen an Wasserdampf an sich binden und in das Tunnelinnere eingetragen werden, kondensieren auf kälteren Bauteiloberflächen, sobald der Taupunkt erreicht wird. Insbesondere wenn die Tunnelschale kontinuierlich von außen durch das Grundwasser gekühlt wird, ist damit zu rechnen, dass sich auf der Betonoberfläche unter den entsprechenden äußeren klimatischen Bedingungen Feuchtigkeit niederschlägt. Das Eindringen von Wasserdampf in den Tunnel kann durch die folgenden Effekte begünstigt werden:

- infolge der Temperaturdifferenz zwischen dem Vorportalbereich und dem Tunnelinneren wird eine natürliche Luftströmung erzeugt,
- ein geodätischer Höhenunterschied zwischen den Portalen führt zu einer natürlichen Luftströmung (Kamineffekt),
- durch fahrenden Verkehr und durch die Aktivierung der Tunnellüftung zur Verbesserung der Luftqualität im Tunnel wird ein künstlicher Luftstrom etabliert.

Schadstoffe werden durch den Verkehr in den Tunnel eingetragen und lagern sich auf Bauteilen und Baustoffen ab. Nach Dauderer [41] stoßen Ottomotoren Aldehyde, Benzol und Kohlenmonoxid, Dieselmotoren zusätzlich Rußpartikel aus. Der Abrieb von Fahrzeugreifen verursacht durch das Zusetzen der Poren in der Fahrbahndecke einen Verlust der Oberflächengriffigkeit und fördert die Bildung eines Wasserfilms, da Oberflächenwasser durch die Poren nicht ablaufen kann. Der Einsatz von Taumitteln im Winter führt zudem dazu, dass aggressive Bestandteile durch den Verkehrsfluss weit in den Tunnel hineingeschleppt werden und Baustoffe chemisch angegriffen werden können. Um die Verkehrssicherheit und das Licht-Reflexionsvermögen dauerhaft zu gewährleisten, bedarf es regelmäßiger Reinigungen der Oberflächen und der betriebstechnischen Anlagen.

Weist das Grundwasser aggressive Eigenschaften auf, so ist auch dies bei der Auswahl der mit dem Grundwasser in Berührung stehenden Baustoffe zu beachten. Die Untersuchung von Grundwasserproben gibt Auskunft darüber, welche ggf. gelösten Schadstoffe im Grundwasser vorliegen; des Weiteren lässt sich der Bereich, an den erhöhte materialtechnologische Anforderungen gestellt werden, örtlich eingrenzen.

Der nächste Abschnitt gibt einen Überblick zu den Baustoffen, die im Tunnelbau üblicherweise zur Anwendung kommen.

4.3.3 Baustoffe im Tunnelbau – Materialeigenschaften und Abnutzungsverhalten

Der bedeutendste Baustoff im Tunnelbau ist der Stahlbeton. Die Rahmenbedingungen beim Einbau von Beton im Tunnelbau werden zum Teil durch bauwerkstypische Umstände begleitet; zur Verdeutlichung der örtlichen Einbaubedingungen seien stellvertretend die Begriffe Wasser, Bodenmaterial und Baustellenausleuchtung angeführt. Auch unter widrigen Bedingungen muss die Verarbeitung von Baustoffen den Anforderungen genügen. Für die weiteren Ausführungen wird davon ausgegangen, dass beim Einbau der Baustoffe sämtliche Qualitätsvorgaben erfüllt werden und Ausführungsmängel unberücksichtigt bleiben können.

Neben der Verarbeitung von Beton und Betonstahl kommen beim Bau von Straßentunneln weitere Baustoffe wie Stahlwerkstoffe, Asphalt, Glas, Kunststoffe, Polymere und Lacke zum Einsatz. Die in Tabelle 14 aufgeführten Baustoffe sollen im Weiteren hinsichtlich der im rechten Teil der Tabelle aufgeführten Eigenschaften näher erläutert werden. Im Anschluss daran wird das Verhalten der Baustoffe unter dauerhaft und kurzfristig wirkenden Belastungen untersucht. Die Bandbreite der Einwirkungen spiegelt dabei die während der Bau- und Betriebsphase typischen Belastungen wider. Es sei bereits an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse dieser Untersuchungen in tabellarischer Form (Tabelle 15 und Tabelle 16) am Ende dieses Abschnittes zu finden sind.

Baustoff	Untergliederung der Baustoffeigenschaften
Beton Betonstahl weitere Stahlwerkstoffe Asphalt Glas Kunststoffe und Polymere Anstriche	Zusammensetzung Funktionen Verarbeitung Abbau des Abnutzungsvorrates Instandhaltungsstrategien

Tabelle 14: Übersicht der Baustoffe und Baustoffeigenschaften

Die Verarbeitung von Beton erfolgt als bewehrter oder unbewehrter Ortbeton bzw. als Nass- oder Trockenspritzbeton. Ein weiterer Einsatzbereich von Beton ist die stationäre Produktion von Betonfertigteilen. Betonfertigteile, die im Tunnelbau zur Anwendung kommen sind beispielsweise Tübbinge, Kabelkanäle, Schächte, Schlitzrinnen, Zwischendecken und -wände oder Verkehrsleitwände.

Je nach Einsatzbereich des Betons können teils mehrere Einflüsse auf den Abbau des Abnutzungsvorrates einwirken. Unter Entwicklung von Hydratationswärme geht mit der Erhärtung des Betons eine charakteristische Volumenverringering einher, die als Schwindprozess bezeichnet wird. Die Folge sind Mikrorisse in der Betonstruktur. Während das Schwindverhalten an Bedeutung verliert, kann der Kriechprozess als Konsequenz aus dem Verformungsverhalten unter Last über die gesamte Nutzungsdauer des Betons andauern; er führt ebenfalls zu Rissen in der Betonstruktur. Wird durch die Risse Wasser in die Betonstruktur eingetragen und kommt es zu einer Reaktion zwischen Kieselsäurebestandteilen der Zuschläge und den in der Porenflüssigkeit gelösten Alkalien des Zementes, so wird dieser Prozess, wie bei Kuhl et al. [117] beschrieben, als Alkali-Kieselsäuren-Reaktion bezeichnet. Auch das Eindringen von gelösten Tausalzen oder weiteren aggressiven Flüssigkeiten kann zur chemischen Zerstörung der Betonmatrix führen. Gefriert in Rissen vorhandenes Wasser, so kann die Volumenvergrößerung des Wassers eine Sprengwirkung auslösen und die Betonmatrix zerstören. Auch kontinuierlich wiederkehrende dynamische Lasten aus bauzeitlichen Vorgängen oder aus der Verkehrsbelastung im Tunnel (Vibration) können Tragfähigkeitsverluste verursachen.

Wiederkehrende Inspektionen verfolgen das Ziel, den Zustand von Betonoberflächen visuell oder anhand unterschiedlicher Messverfahren zu bewerten. Risse können beispielsweise durch die kraftschlüssige Versiegelung mit Spezialharzen saniert werden. Zeichnen sich bereits bei der Planung eines Tunnelbauwerks Bereiche ab, die bei einer Rissbildung zu Undichtigkeiten neigen werden, so sind bereits vor der Betonage Verpressschläuche einzulegen, die im Bedarfsfall mit geeigneten Dichtungsmaterialien beaufschlagt werden. Eine zusätzliche Vergütung von Betonoberflächen kann durch den Auftrag von Spezialmörteln erreicht werden. Bei diesen Beschichtungssystemen handelt es sich um kunststoffmodifizierte, zementgebundene Mörtel, die zum Oberflächenschutz oder zur Sicherstellung der geforderten Betondeckung zum Einsatz kommen. Weitere Maßnahmen zur Instandhaltung von Betonbauteilen beinhaltet das SIVV-Handbuch des Deutschen Beton- und Bautechnik Vereins e.V., Berlin [46]. Die Abkürzung SIVV steht für das „Schützen, instand hal-

ten, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen“. Das SIVV-Handbuch umfasst Vorgaben, die im Hinblick auf eine qualitätssichernde Betonsanierung bei öffentlichen Bauvorhaben zwingend einzuhalten sind.

Der Beton- bzw. Bewehrungsstahl übernimmt im Verbund mit dem ummantelnden Beton den statischen Lastabtrag, insbesondere bei Zugbeanspruchung. Eine weitere wichtige Aufgabe kommt dem Bewehrungsstahl nach DIN EN 1992-1-1 [59] zur Beschränkung der Rissbreiten in der Betonstruktur zu. Untereinander wird der Betonstahl durch Stahldraht, seltener durch Schweißung oder durch den Einbau von Muffen verbunden. Damit die erforderliche Betondeckung zur Oberfläche bzw. zu weiteren Bewehrungslagen eingehalten wird, sind Abstandhalter mit in die Anordnung der Bewehrung zu integrieren. Durch die Alkalität des Porenwassers ($\text{pH} = 12,5 \dots 13,5$) ist der Stahl im Beton vor Korrosion geschützt. „Im Bereich solcher pH-Werte“, so Breitenbücher [14], „bildet sich auf der Stahloberfläche eine mikroskopisch-dünne Oxidschicht aus, welche die anodische Eisenauflösung praktisch unterbindet“. Bei pH-Werten über etwa 12 verhält sich der Betonstahl damit, so weiter in [14], „wie Edelstahl in normaler Atmosphäre. Wenn der pH-Wert des Betons auf unter 9 abfällt oder wenn der Chloridgehalt des Betons einen kritischen Grenzwert überschreitet, geht die Passivschicht und als Folge davon der Korrosionsschutz entweder örtlich eng begrenzt oder über größere Oberflächenbereiche verloren“. Korrosion des Stahls führt zu Spannungen im Stahlbetongefüge und löst Abplatzungen an der Betonoberfläche aus. Wird Betonstahl nach dem Verlust der Betonummantelung über lange Zeit extremen Temperaturen, beispielsweise einem Brand ausgesetzt, so verliert er an Tragfähigkeit. Die Instandhaltungsstrategie für den Betonstahl entspricht den Ausführungen für den Beton. Wenn der Beton seine Schutzfunktion beibehält, ist auch der Betonstahl optimal geschützt.

Bei Tunnelbauten kommen Stahlwerkstoffe in vielfältigen Bereichen zum Einsatz, z.B. bei Tor- und Türanlagen, Beschilderungen, Leitplanken, Versorgungsleitungen, betriebstechnischen Anlagen sowie deren Einhausung, Befestigungsbolzen und Ankerschienen sowie bei der Verkleidung der Tunnelwandung mit Lärmschutzpaneelen. Je nach Aufgabe, die der Stahlwerkstoff erfüllen soll, kommen unlegierte, legierte oder nichtrostende Stähle zum Einsatz. Werden zwei leitfähige, unterschiedlich edle Stahlwerkstoffe miteinander verbunden, so ist der direkte Kontakt durch Isolierstücke oder -flansche zu unterbinden. Anderenfalls kommt es unter Anwesenheit von Wasser dazu, dass ein schwacher Strom fließt und Kontaktkorrosion verursacht. Korrosion oder das Aufzehren des Korrosionsschutzes tragen zum Abbau des Abnutzungsvorrates bei. Wird im Rahmen von Inspektionen Korrosion festgestellt oder durch eine Schichtstärkenmessung des verbleibenden Korrosionsschutzes Instandsetzungsbedarf erkennbar, so ist nach Vorbehandlung der Korrosionsschutz zu erneuern. Desweiteren ist die Wirksamkeit von Isolationsstücken und -flanschen zu überprüfen und ggf. zu erneuern. Schraub- und Schweißverbindungen sind ebenfalls in regelmäßigen Abständen zu inspizieren.

Asphalt kommt im Tunnelbau bei der Herstellung der Fahrbahn- und Randwegbeläge zur Anwendung. Der Einbau des Asphalts erfolgt in der Regel in drei Schichten; nacheinander werden Trag-, Binder- und Deckschicht im Heißeinbauverfahren aufgetragen. Maßgeblich unterscheiden sich die Schichten durch die Sieblinie der mineralischen Zuschlagstoffe.

Nach Straube und Beckedahl [153] neigt der Asphalt zur Rissbildung durch Ermüdung unter Verkehrsbelastung. Der Verkehrsfluss führt zu Zugbeanspruchungen im Asphalt. Herrschen zeitgleich tiefe Temperaturen, so erhöhen sich die Zugbeanspruchung und die Tendenz zur Rissbildung. Charakteristisch für den Abbau des Abnutzungsvorrates sind die Bildung von Spurrinnen im Asphalt und der Verlust der Griffigkeit. Letzteres wird auch dadurch vorangetrieben, dass Splittkörner an der Fahrbahnoberfläche nicht mehr ausreichend vom Bindemittel gehalten werden. Dieser Prozess wird nach [153] als Ausmagerung bezeichnet.

Die regelmäßige Entfernung von Taumittelrückständen und Reifenabrieb trägt dazu bei, die Nutzbarkeit der Fahrbahnoberfläche langfristig zu erhalten. Kleinflächige Reparaturen an der Deckschicht können unter dem Einsatz von Kaltasphalt erfolgen, dabei wird die Erhöhung der Griffigkeit durch das aufeinanderfolgende Ausbringen von Bitumenemulsion und Splitt erreicht. Im Rahmen einer größeren Instandhaltungsmaßnahme

kann es ausreichend sein, lediglich eine neue Deckschicht nach vorherigem Abfräsen der alten Deckschicht aufzubringen; im Allgemeinen besitzen die unterliegenden Trag- und Binderschichten längere Nutzungsdauern.

Einzelne Ausrüstungsgegenstände im Tunnel beinhalten Bauteilkomponenten, die aus Glas gefertigt sind. Glaskörper und Glasscheiben kommen im Tunnelbau beim Schutz von Beleuchtungsanlagen, Wechselverkehrszeichen oder bei Sichtfenstern in Türen oder Notrufräumen zum Einsatz. Es handelt sich um vorgefertigte Formteile, die in der Regel nicht dauerhaft mit technischen Einheiten verbunden sind und bei Bedarf separat ausgewechselt werden können. Damit die in der Regel klaren Glaswerkstoffe ihre Funktion zuverlässig erfüllen, sind Schmutzpartikel regelmäßig zu entfernen. Wird die volle Funktionsfähigkeit nicht mehr gewährleistet oder erfolgt eine irreparable mechanische Zerstörung, ist der sofortige Austausch vorzunehmen.

Bei Kunststoffen und Polymeren handelt es sich um Festkörper, deren Grundbestandteile synthetisch oder halbsynthetisch sind. Bei Kunststoffen und Polymeren wird zwischen Thermoplasten, Duroplasten und Elastomeren unterschieden (vgl. Ehrenstein [63]). Thermoplaste können durch Energiezufuhr in beliebige Formen gebracht werden und halten die Formgebung nach Abkühlung bei. Bei Duroplasten führt eine Erwärmung nicht zu einer Verformbarkeit, vielmehr verursacht sie die Zersetzung der Ausgangsstruktur. Für den Einsatz im Tunnel sind Duroplaste nicht geeignet. Elastomere zeichnen sich dadurch aus, dass sie sich unter einer kurzzeitigen Druck- oder Dehnbelastung verformen lassen, nach Beendigung der Belastung aber die ursprüngliche Form wieder annehmen.

Im Tunnelbau finden überwiegend Thermoplaste Anwendung. Beispiele sind Fahrbahnmarkierungen als Klebestreifen, Kunststofffasern zur Bewehrung des Betons, Kunststoffrohre oder Bewehrungsabstandhalter. Noppenfolien, Geotextilien, Dichtungsbahnen und Fugenbänder werden ebenfalls aus Thermoplasten gefertigt und sind Bestandteile der Abdichtung des Tunnels gegen Grund- und Sickerwasser. Elastomere, die beim Tunnelbau zur Anwendung kommen, sind beispielsweise Kabelummantelungen, bestimmte Arten von Fugenbändern und Isolationsflansche. Die ausschließlich stationär gefertigten Produkte werden auf die Baustelle geliefert und vor Ort zusammengefügt.

Kunststoffe haben vielfältige Anwendungsgebiete. Unabhängig von spezifischen Einwirkungen erfolgt der Abbau des Abnutzungsvorrats allgemein durch Last- und Temperaturwechsel. Bei Rohren, die aus einem thermoplastischen Kunststoff gefertigt und als Drainageleitungen verwendet werden, wird der Verschleiß beispielsweise zusätzlich durch Hochdruckspülvorgänge verursacht. Aufgrund von Brandschutzbestimmungen sind im Tunnel verbaute Kunststoffe in der Regel nach der Installation nicht mehr oder nur unter großem Aufwand zugänglich.

Anstriche können als Haftgrund, Korrosionsschutz, Versiegelung oder zur Verstärkung der Reflexionseigenschaften dienen. Insbesondere um die Orientierung im Tunnel zu verbessern sind sicherheitstechnische Einrichtungen, Beschilderungen und Markierungen in Signalfarben gestaltet oder mit selbstreflektierenden Eigenschaften ausgestattet. Als weitere Anwendung kommt primär im portalnahen Bereich der Auftrag von Anti-Graffiti-Schutanstrichen zum Einsatz.

Kennzeichnend für den Abbau des Abnutzungsvorrates bei Anstrichen ist der Verlust der Wirkung als Korrosionsschutzschicht oder das Nachlassen des Signalisierungs- oder Reflexionsvermögens. Im Zuge der Instandsetzung von Anstrichen sind schonende Reinigungsverfahren anzuwenden oder, falls erforderlich, örtliche Ausbesserungsmaßnahmen durchzuführen.

Die diskutierten Anwendungsbereiche, Abnutzungseigenschaften und Instandhaltungsstrategien der im Tunnelbau zur Anwendung kommenden Baustoffe werden abschließend mit Einwirkungen überlagert, die sowohl unter gewöhnlichen als auch unter außergewöhnlichen Rahmenbedingungen im Tunnel eintreten können. Dabei wird zwischen Einwirkungen unterschieden, die natürlichen (Tabelle 15) bzw. anthropogenen

(Tabelle 16) Ursprungs sind. Die Tabellen zeigen die resultierenden lang- und kurzfristigen Konsequenzen einer einzelnen Einwirkung auf. Während die natürlichen und die mit der bestimmungsgemäßen Benutzung des Tunnelbauwerks anthropogenen Einwirkungen zu einem stetigen Abbau des Abnutzungsvorrats führen, resultieren aus Fahrzeuganprall, Brand und Explosion Maßnahmen, die in der Regel die sofortige Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit des Tunnelbauwerks erforderlich machen. Auf typische Nutzungsdauern der einzelnen Werkstoffe wird an dieser Stelle nicht eingegangen, sie sind Umfang der Beschreibungen in Abschnitt 4.3.4.

Baustoff ⇒ Einwirkung ↓		Auswirkungen auf das Werkstoffverhalten						
		Beton	Betonstahl	weitere Stahlwerkstoffe	Asphalt	Glas	Kunststoff	Anstriche
natürlich	Temperatur	Schwindverhalten infolge Hydratationswärme → Risse; Frost in Verbindung mit Feuchtigkeit → Risse, Abplatzungen	im natürlichen Bereich unempfindlich	Frost → Aufplatzen flüssigkeitsgefüllter Rohrleitungen möglich	tiefe Temperaturen → Erhöhung der Zugspannungen	im natürlichen Bereich unempfindlich	abhängig von der Art, ggf. Verformung bei Hitze, Spröbruchgefahr bei Kälte	im natürlichen Bereich unempfindlich
	Feuchtigkeit	in Verbindung mit Frost → Risse, Abplatzungen; Alkali-Kieselsäure-Reaktion → Risse, Abplatzungen	Bewehrungskorrosion verursacht Volumenvergrößerung → Betonabplatzungen	Sauerstoffkorrosion, Lochfraßkorrosion, wenn Schutzschicht bereits örtlich zerstört ist	in der Regel unempfindlich, in Verbindung mit Frost → Rissbildung und örtliche Schädigung möglich	unempfindlich	unempfindlich	unempfindlich wenn Schutzschicht intakt
	Spannungsumlagerung im Gebirge (betrifft nur die Tunnelschale)	Kriechverhalten → Risse, Abplatzungen	bis zur Tragfähigkeitsgrenze keine Auswirkung	--	--	--	Dehnung bzw. Unebenheiten können Undichtigkeiten in Dichtungsbahn hervorrufen	--
	Grundwasser (betrifft nur die Tunnelschale)	Auftrieb, Undichtigkeiten → Risse, Kalkausblühungen; chem. Angriff	Bewehrungskorrosion bewirkt Volumenvergrößerung → Betonabplatzungen	--	--	--	chemischer Angriff (betrifft Vlies, Dichtungsbahn, Noppenfolie)	--

Tabelle 15: Auswirkungen auf das Baustoffverhalten bei natürlichen Einwirkungen

Baustoff ⇒ Einwirkung ↓		Auswirkungen auf das Werkstoffverhalten						
		Beton	Betonstahl	weitere Stahlwerkstoffe	Asphalt	Glas	Kunststoff	Anstriche
anthropogen	Dynamische Lasten (Verkehr)	Kriechverhalten → Risse, Abplatzungen	bis zur Tragfähigkeitsgrenze keine Auswirkung	bis zur Tragfähigkeitsgrenze keine Auswirkung	insbesondere bei Zugbelastung → Spurrinnenbildung, Rissbildung	gegen Vibration geschützt	Überrollung geklebter Straßenmarkierung → Ablösung, Reflexionsverlust	Überrollung flüssig aufgetragener Straßenmarkierung → Reflexionsverlust
	Schadstoffe (Tausalze etc.)	Betonkorrosion	Bewehrungskorrosion	Stahlkorrosion	ggf. gefügezerstehend	resistent	ggf. gefügezerstehend	ggf. gefügezerstehend
	Pkw- bzw. Lkw-Anprall	je nach Intensität und Anprallwinkel Abplatzung der Betondeckung möglich	bis zur Tragfähigkeitsgrenze keine Auswirkung	plastisches Verformungsverhalten	unempfindlich	sprödes Verhalten → Zerstörung	außerhalb des Verkehrseinflussbereichs	außerhalb des Verkehrseinflussbereichs
	Brandereignis	Abhängigkeit von Temperatur und Expositionsdauer → Abplatzungen	Abhängigkeit von Temperatur und Expositionsdauer → Tragfähigkeitsverlust	Abhängigkeit von Temperatur und Expositionsdauer → Tragfähigkeitsverlust, Deformation	Bitumen bei hohen Temperaturen brennbar → Veränderung der Asphalteeigenschaften	Ausdehnung → Rissbildung, Bersten	in der Regel durch Betonummantelung geschützt → Zerstörung geht mit Betonverhalten einher	Zerstörung
Explosionsereignis	Ausbildung von Bruchkratern, ggf. über die gesamte Bauteildicke	Freilegung kann Komplettersagen auslösen	Deformation, Zersplitterung	Zerstörung des Asphaltgefüges	sprödes Verhalten führt zu Zerstörung		geht mit dem Versagen des Bauteils einher	

Tabelle 16: Auswirkungen auf das Baustoffverhalten bei anthropogenen Einwirkungen

In aller Regel verursacht die Kombination mehrerer Einwirkungen zeitgleich den Abbau des Abnutzungsvorrates eines Baustoffs. Abgesehen von Fahrzeuganprall, Brand und Explosion führen sämtliche weitere Einwirkungen dazu, dass die theoretische Nutzungsdauer unter der regelmäßigen Durchführung von Inspektion, Wartung und Instandsetzung erreicht wird.

4.3.4 Bauteile und technische Betriebskomponenten in einem Straßentunnel

Die Wahl der geeigneten Tunnelbauweise hängt im Wesentlichen von der Topografie, der Geologie, der umliegenden Bebauung sowie von den in Abschnitt 4.3.2 erläuterten inneren Randbedingungen ab. Jede Bauweise zeichnet sich durch verfahrensspezifische Charakteristika aus und – dies ist im Besonderen für die Lebenszykluskostenanalyse relevant – macht den Einsatz verschiedener Bauteile und Baustoffe erforderlich.

Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen ist ein Tunnelbauwerk, das nach den im Jahr 2012 in Deutschland gültigen Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT) [72] errichtet und in das Bundesfernstraßennetz integriert wird. Die Bauteile, die im Zuge des Bauprozesses zur Anwendung kommen, lassen sich nach den folgenden Kriterien in zwei Gruppen unterteilen: Die erste Gruppe umfasst diejenigen Bauteile und Baustoffe, die während der Rohbauphase verarbeitet werden. Bauteile, die der betriebstechnischen Ausstattung des Straßentunnels zugeordnet werden, gehören der zweiten Gruppe an.

Die Bauteile der ersten Gruppe sind in Tabelle 17 aufgeführt und umfassen sämtliche Elemente, die – unterteilt nach der Bauweise – in der Rohbauphase zur Ausführung kommen. Abgesehen von der Errichtung einer oder mehrerer Verkehrsröhren, ist auch die Erstellung weiterer Nebenbauwerke erforderlich. Zu den Nebenbauwerken zählen Notausgangsstollen und -schächte, Querschläge zwischen einzelnen Tunnelröhren sowie Lüftungs- und Betriebszentralen. Die Erstellung der Haupt- und Nebenbauwerke erfordert die Anwendung unterschiedlicher Bauverfahren – beispielsweise erfolgt nach der maschinellen Auffahrung von zwei Tunnelröhren der Vortrieb der Querschläge in konventioneller Bauweise. Der Gebrauch der Tabelle 17 erfolgt modular – aus der Gesamtheit aller aufgeführten Bauteile werden nur diejenigen ausgewählt, die für das betrachtete Tunnelbauwerk benötigt werden. Neben den Standardbauverfahren ist anhand der Tabelle auch die Kombination von Bauweisen möglich, die nur selten zur Ausführung kommen. Eine Bauweise, die in Deutschland nicht sehr häufig angewendet wird, ist beispielsweise der Einbau einer Ortbetoninnenschale in einen maschinell aufgefahrenen Tunnel mit Tübbing-Außenschale.

Aus Tabelle 17 geht auch hervor, welche Funktionen den einzelnen Bauteilen zukommen und aus welchen Hauptbaustoffen sie bestehen. Zudem ist in der Tabelle angegeben, ob das Bauteil nach Fertigstellung des Bauwerks für Wartung und Inspektion zugänglich ist und ob während der gesamten Lebenszyklusdauer im Rahmen von Instandhaltungsmaßnahmen Instandsetzungen (IS) oder Verbesserungen (VB) vorzunehmen sind. Aus dieser Differenzierung leitet sich ab, dass nicht zugängliche Bauteile des Rohbaus mindestens die gleiche Nutzungsdauer von 100 bis 130 Jahren aufweisen müssen wie der Innenschalenbeton bzw. der Ausbau mit Tübbing. Lediglich einzelne Elemente der Entwässerungssysteme, Türen, Tore, Asphalt-schichten und Hochbauten müssen über den Lebenszyklus eines Tunnels in Intervallen von 30 bis 50 Jahren ausgetauscht werden.

Instandsetzung (IS), Verbesserung (VB)					
Zugänglichkeit für Wartung nach Bauwerksfertigstellung					
Konventionelle (K), maschinelle (M), offene (O) Bauweise					
Bauteil	Funktion	Hauptbaustoffe			
Außenschale	vorläufige Gebirgssicherung mit temporärer Tragfähigkeit	Beton (i.d.R. Spritzbeton), Betonstahl, ggf. Bewehrungsfasern	K	nein	--
Trenn- und Abdichtungslagen (auf der Außenschale verlegt) (1) Noppenfolie (2) Vlies (3) Kunststoff-Dichtungsbahn (KDB) (4) Fugenbänder	(1) Schaffung gezielter Wasserwegigkeiten (2) Schutz der KDB vor Unebenheiten (3) Abdichtung vor Grund- und Sickerwasser (4) Unterbindung von Wasserwegigkeiten zwischen einzelnen Bauabschnitten	Thermoplastische Kunststoffe	K, M (selten), O (4), (1)–(3) ggf. auf Bauwerk	nein	(3) ggf. IS*
Innenschale (1) bewehrt (2) unbewehrt	Statisch vollständig bemessenes Tragwerk	Beton, in Nebenstollen oder -schächten ggf. Spritzbeton, ggf. Betonstahl, ggf. Bewehrungsfasern	K, M (selten)	teilweise	IS
Firstspaltverfüllung	Kraftschlüssiger Verbund zwischen Innenschale und Baugrund im Firstbereich	Mörtel	K	nein	--
Tübbingeinbau (1) als Innenschale (2) als Außenschale	(1) Statisch vollständig bemessener Tragring (2) vorläufige Gebirgssicherung	Beton, Betonstahl, ggf. Bewehrungsfasern	M	(1) teilweise luftseitig (2) nein	(1) IS (2) --
Ringspaltverpressung	Kraftschlüssiger Verbund zwischen Tübbing und Baugrund	Mörtel	M	nein	--
Offene Bauweise, Portal (1) Rahmenbauwerk, bestehend aus Sohle, Wand, Decke (2) Gewölbebauwerk, bestehend aus Sohle, Gewölbe	Statisch vollständig bemessenes Tragwerk	Beton, Betonstahl, ggf. Bewehrungsfasern	O	teilweise	IS
Entwässerung (1) Drainagestränge (2) Revisionsschächte mit Abdeckung (3) Sammelbecken	Abführung von Berg- bzw. Tunnelwasser	Kunststoff, Beton, Stahlwerkstoffe	alle	teilweise	IS
Zwischendecke/seitliche Trennwand	Errichtung von Zu-/Abluftkanälen	Beton, Betonstahl	alle	ja	IS, ggf. VB
Schallschutzbekleidung	Schallschutz im Umfeld der Tunnelportale	Stahlkassette mit eingelegtem Dämmmaterial	alle	ja	IS, ggf. VB
Notausgangstüren und -tore	Trennung zwischen Verkehrstunnelröhre und Sicherheitsbereich	Stahlwerkstoffe, Lackierung in Signalfarbe	alle	ja	IS
Nischen	Aufnahme von Betriebseinrichtungen	Beton, Betonstahl, Stahlwerkstoffe	alle	ja	IS, ggf. VB
Auflagerkonsolen	Mit der Innenschale biegesteif verbundene Konsolen zur Auflagerung der Zwischendecke bzw. von betriebstechnischen Anlagen	Beton, Betonstahl, Stahlwerkstoffe	alle	ja	IS, ggf. VB
Ankerschienen	Mit der Innenschale biegesteif verbundene Schienen zur Fixierung von Ausrüstungsgegenständen	Stahlwerkstoffe	alle	ja	IS, ggf. VB
Leerrohrtrasse/Kabelkanal	Kabelverlegung	Kunststoff	alle	teilweise	IS
Vorsatzschale (1) bewehrt (2) unbewehrt	Brandschutz, Anprallschutz	Beton, Betonstahl, ggf. Bewehrungsfasern	alle	ja	IS, ggf. VB
Oberflächenversiegelung (1) Fahrbahn (2) Notgehwege	Fahrweg, Fußweg (Fluchtwege)	Asphalt, Beton	alle	ja	IS, VB
Fahrbahmentwässerung	Schlitzzrinne mit Abschnittstrennung zur Vermeidung der Ausbreitung von Flüssigkeitsbränden	Betonfertigteile, Stahlwerkstoffe	alle	ja	IS
Hochbau	Betriebsgebäude	Beton, Betonstahl, Mauerwerk, Stahlwerkstoffe	alle	ja	IS

*) Kommt es nach der Bauwerksfertigstellung im Bereich von Bauwerksfugen zu Wasserzutritten, so deutet dies darauf hin, dass die ggf. vorhandene Kunststoffdichtungsbahn Undichtigkeiten aufweist. Aufgrund mangelnder Zugänglichkeit muss die Sanierung durch Ersatzmaßnahmen kompensiert werden: (1) Nachverpressung von Fugenbändern mit Kunstharzen, (2) Ableitung des einströmenden Wassers in eine Drainageleitung

Tabelle 17: Charakteristika der Bauteile in der Rohbauphase

Im Tunnelbau ist die Innenschale das Rohbauelement, welches aufgrund seiner statischen Tragwerksfunktion die Nutzungsdauer maßgeblich bestimmt. Ist aufgrund des Zustandes der Innenschale eine sichere Verkehrsführung durch den Tunnel nicht mehr möglich, so ist das Lebenszyklusende erreicht. Die Innenschale besitzt somit im Gegensatz zu allen weiteren Rohbaukomponenten eines Tunnels das Alleinstellungsmerk-

mal, die gesamte Lebenszyklusdauer zu bestimmen. Erfolgt ein Austausch der Innenschale, so ist damit zwingend auch die Neuinstallation aller weiteren Bauteile und Komponenten verbunden.

Die zugänglichen Bauteile des Rohbaus erfordern periodisch wiederkehrend Inspektion, Wartung und Instandhaltung. Beispielsweise sind Betonoberflächen, wie in Abschnitt 4.3.3 erläutert, auch unter regulären Betriebsbedingungen einer Reihe von Einwirkungen ausgesetzt, die den Abnutzungsvorrat kontinuierlich aufzehren. Darüber hinaus sind in Dränageleitungen und -schächten Ablagerungen unter Einsatz von Hochdruckspülverfahren zu entfernen. Eine Vernachlässigung der Instandhaltung der Bergwasserdränage kann beispielsweise dazu führen, dass das Sickerwasser im Baugrund ansteigt und die statischen Bemessungsansätze für die Tunnelauskleidung überschritten werden. Der Druck, der infolge des erhöhten äußeren Wasseranstiegs auf die Betonschale einwirkt, stellt einen unplanmäßigen Belastungszustand dar.

In Analogie zur Erfassung der Rohbauelemente werden im Folgenden die für den sicheren Straßentunnelbetrieb erforderlichen Ausrüstungskomponenten zusammengestellt. Für ein konkretes Tunnelprojekt sind unter Berücksichtigung der Vorgaben der RABT [72] die notwendigen Ausstattungselemente auszuwählen und dem Bedarf entsprechend zu dimensionieren. Im Gegensatz zu den Eigenschaften der Bauteile der Rohbauphase ist die technische Tunnelausrüstung weitgehend unabhängig von der Bauweise, in der der Tunnel erstellt wurde. Die Zugänglichkeit der Ausstattungselemente stellt wie auch bei den Bauteilen des Rohbaus ein wichtiges Kriterium der Tunnelbetriebsphase dar. Der Zugang ist die wesentliche Voraussetzung dafür, dass technische Ausrüstungsgegenstände inspiziert, gewartet und ausgetauscht werden können.

Die technischen Anlagen werden elektrisch betrieben und über die zentrale Leittechnik gesteuert. Aufgabe der zentralen Leittechnik ist es, die automatische Steuerung, Regelung und Überwachung der technischen Ausstattung im Tunnel sicherzustellen. Die zentrale Leittechnik besteht, wie in Abbildung 30 dargestellt, aus einem zentralen Leitreechner, einem Kommunikationssystem und einzelnen speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS). Der zentrale Leitreechner sowie die speicherprogrammierbaren Steuerungen sind in den Betriebsräumen abseits der Verkehrsröhre installiert. Über ein Bussystem wird die Datenübertragung zwischen der Leittechnik, der SPS und den technischen Komponenten im Tunnel gewährleistet. Jede SPS ist, wie in Abbildung 30 angedeutet, einer spezifischen Funktionsebene zugeordnet. Wie Eismann [64] ausführt, übernimmt die SPS automatische Steuerungsaufgaben und repräsentiert die Schnittstelle zu unterlagerten Systemen, wie Videoanlagen, Brandmeldesysteme und Lautsprecheranlagen. Die SPS der Beleuchtungsanlage regelt beispielsweise die Intensität der Streckenausleuchtung in den einzelnen Tunnelabschnitten. Neben verkehrlichen Randbedingungen, wie die zulässige Geschwindigkeit oder die Verkehrsstärke im Tunnel, gehen Daten aus der Messung der Leuchtdichte zur Weiterverarbeitung in die SPS ein.

Während der zentrale Leitreechner der Anlagenleitebene zugeordnet wird, ist die SPS Bestandteil der sogenannten Automatisierungsebene. Sämtliche Bauteile, die im Tunnel installiert sind oder die Anbindung zwischen der SPS und dem Bauteil sicherstellen, sind Bestandteile der Feldebene. Die übergeordnete Leitebene ist hingegen nur dann vorhanden, wenn Überwachung und Steuerung eines Tunnels von einer Tunnelleitzentrale oder von einer Verkehrsrechnerzentrale aus möglich sind. Diese hierarchische Zuordnung ist ebenfalls der Abbildung 30 zu entnehmen.

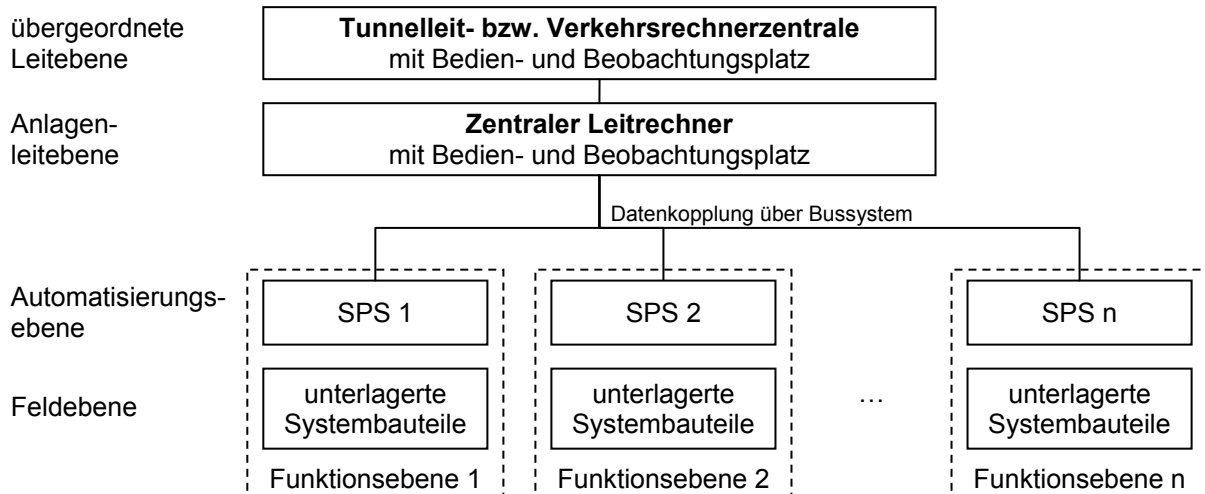


Abbildung 30: Hierarchie der Ebenen der Tunnelbetriebstechnik

Nach Experteneinschätzung ist die zentrale Leittechnik etwa alle acht Jahre auszutauschen, speicherprogrammierbare Steuerungen weisen eine mittlere Nutzungsdauer von 15 Jahren auf. Die technischen Bauteile der Feldebene besitzen verschiedene theoretische Nutzungsdauern, so dass ersichtlich wird, dass eine Kompatibilität zwischen dem Leitreechner, der SPS und dem technischen Bauteil jederzeit gewährleistet sein muss. Während die gesamte Bauwerksnutzungsdauer an die statische Funktionserfüllung des Rohbaus geknüpft ist, beeinflusst der in Abschnitt 3.2 beschriebene Produktlebenszyklus die Nutzungsdauer der technischen Komponenten der Leit-, Automatisierungs- und Feldebene.

In Tabelle 18 werden die technischen Bauteile der Feldebene nach der für die RABT gewählten Terminologie der Funktionsebene aufgeführt. Zusätzlich wird für jede Funktionsebene in der zweiten und dritten Tabellenspalte angegeben, welche Bauteile und Hauptbaustoffe zum Einsatz kommen. Des Weiteren werden die technischen Bauteile bezüglich ihrer Bedeutung für den regulären Betrieb und nach ihrer Sicherheitsrelevanz kategorisiert. Die Funktion eines sicherheitsrelevanten Bauteils kommt in der Regel erst dann zum Tragen, wenn ein außergewöhnlicher Vorfall im Tunnel eintritt und die Selbstrettungsphase der Tunnelnutzer bis zum Eintreffen der Fremdrettung im Vordergrund steht. Aber auch die Bauteile, die den regulären Tunnelbetrieb unterstützen, erhalten, wie in der vierten Tabellenspalte aufgeführt, mit Eintritt eines außergewöhnlichen Ereignisses im Tunnel ebenfalls eine indirekte sicherheitsrelevante Funktion. Die in der letzten Tabellenspalte angeführten theoretischen Nutzungsdauern spiegeln die Ergebnisse von Expertenbefragungen wider. Durch einen Teilbericht zum Forschungsprojekt TUNCONSTRUCT [74] wird die Größenordnung der in Tabelle 18 angegebenen Nutzungsdauern – auch wenn die Untergliederung in [74] weniger detailreich ist – im Ansatz bestätigt. Für eine Auswertung von Nutzungsdauern elektrischer Anlagenkomponenten in Tunneln lagen, wie Welte [168] und PIARC [137] berichtet, Daten von 27 Bauwerken aus zehn Ländern vor. Demnach betragen die mittleren Austauschzyklen für die Beleuchtung 10 Jahre, für die Lüftung 18 Jahre, für sicherheitstechnische Einrichtungen 15 Jahre und für Kabel etwa 26 Jahre. Diese Größenordnungen werden auch von Holst [100] angeführt. Das vom britischen Department for Transport herausgegebene Design Manual für Roads and Bridges [43] beinhaltet in der Anlage G eine Sammlung von Werten, die für die Nutzungsdauer der Tunnelausstattung herangezogen werden kann. Danach werden unter Beachtung der projektspezifischen Rahmenbedingungen beispielweise für Pumpen und Überwachungskameras Nutzungsdauern von 15 Jahren, für Achsiallüfter von 30 Jahren, für Beleuchtungskörper von 18 Jahren und für messtechnische Anlagen von 13 bis 20 Jahren vorgeschlagen.

Im Vergleich zu der in Abschnitt 2.5.7 aufgeführten Tabelle 7, welche die theoretischen Nutzungsdauern nach der ABBV [32] beinhaltet, sind zu den zuvor zitierten Literaturquellen erhebliche Abweichungen festzu-

stellen. Gemäß ABBV sind für betriebs- und verkehrstechnische Ausstattungselemente theoretische Nutzungsdauern von pauschal 20 Jahren anzunehmen. Eine Lebenszykluskostenberechnung für Straßentunnel, die lediglich auf den Angaben der ABBV beruht, vermittelt insgesamt eine zu optimistische Sichtweise.

Theoretische Nutzungsdauer in [Jahren]					
Bauteil ist für die Sicherheit relevant					
Bauteil zur Gewährleistung des regulären Tunnelbetriebs					
Funktionsebene (FE) nach RABT [72]	Erforderliche Bauteile	Hauptbaustoffe			
FE 1: Beleuchtungsanlage Ausleuchtung von Fahr- bzw. Rettungswegen	(1) Beleuchtungseinheit, bestehend aus: (a) Gehäuse, (b) Leuchtmittel (2) Leuchtdichtmessgerät	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, Glas, Kunststoffe (Kabelummantelung)	primär	indirekt	(1a) >15 (1b) 3 (2) > 10
FE 2: Verkehrsanlage Steuerung und Beeinflussung des Fahrzeugverkehrs	(1) Höhenkontrolle (2) Schrankenanlage (3) starre Verkehrszeichen (4) Wechsellichtzeichen (5) Dauerlichtzeichen / Leiteinrichtung (6) Wechselverkehrszeichen	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, teilweise Glas, Kunststoffe (Kabelummantelung)	primär (1) bis (6)	(1), nach Ereignis (2), (4), (5), (6)	(1) bis (6) > 15
FE 3: Lüftungsanlage Luftaustausch während des Regelbetriebs bzw. Ableitung von Rauch im Brandfall	(1) Ventilatoren (2) Rauchabzugsklappe (3) CO-Messgerät (4) Trübungsmessgerät (5) Strömungsgeschwindigkeitsmessgerät	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, teilweise optische Glaslinsen, Kunststoffe (Kabelummantelung)	ja	ja	(1), (2) > 15 (3) bis (5) > 10
FE 4: Brandmeldeanlage Automatische bzw. durch Nutzer ausgelöste Meldung eines Tunnelbrandes	(1) Linienbrandmeldekabel (2) Druckknopfmelder	(1) Stahlwerkstoffe, Kunststoffe (Kabelummantelung), elektronische Bauteile (2) Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, Glas	--	ja	(1), (2) > 15
FE 5: Fluchtwegkennzeichnung, Orientierungsbeleuchtung Orientierung während der Selbstrettingsphase	(1) Fluchtwegkennzeichnung mit Richtungs- und Entfernungsangabe (2) Brandnotbeleuchtung (3) selbstleuchtende Notausgangsmarkierung	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, teilweise Glas, Kunststoffe (Kabelummantelung)	--	ja	(1) bis (3) > 15
FE 6: Videosystem Überwachung des Tunnelbetriebs und Detektion von Ereignissen	Starre bzw. schwenkbare Videoüberwachungskameras	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, optische Glaslinsen, Kunststoffe (Kabelummantelung)	indirekt	primär	> 10
FE 7: Lautsprecheranlage Weitergabe von Handlungsanweisungen an Tunnelnutzer	Lautsprecher	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, Kunststoffe (Hörner, Kabelummantelung),	indirekt	primär	> 10
FE 8: Notrufsysteme Meldung eines Notfalls durch den Tunnelnutzer	Notrufrkabine mit (1) Notruftelefon (2) Feuerlöscher (3) Schließkontakte	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, teilweise Glas, Signallackierung	--	Ja	> 15
FE 9a: Löschwasserversorgung Brandbekämpfung durch die Feuerwehr in der Fremdretingsphase	(1) Rohrsystem mit Feuerwehrhydranten (2) Pumpen (3) Löschwasserbecken	(1), (2) Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile (3) Stahlbeton, Stahlwerkstoffe	--	ja	(1) 50 (2) > 15 (3) > 80
FE 9b: Entwässerung Sammlung und Abführung von Berg- und Tunnelwässern	(1) Sickerrohre (2) Pumpen (3) Sammelbecken	Kunststoffe, Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, Stahlbeton	primär	--	
FE 10: Tunnelfunkanlage Kommunikation mit Tunnelnutzern bzw. zwischen Behörden und Organisationen	(1) Funk für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS-Funk) (2) Mobilfunknetz (3) Signalverstärkung Rundfunknetz mit Einsprechfunktion	Stahlwerkstoffe, Kunststoffe, elektronische Bauteile	indirekt	primär	(1) bis (3) > 15
FE 11: Energieversorgung Strom- und Notstromversorgung	(1) Anschluss an zwei redundante Netze (2) Transformatoren, Unterverteilung (3) Unabhängige Stromversorgung über Batterien (USV)	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile, Kunststoffe und Isolatoren	primär	indirekt	(1), (2) > 20 (3) 8
FE 12: Gebäudetechnik Technische Gebäudeausrüstung (TGA)	(1) Betriebsraumlüftung und -klimatisierung	Stahlwerkstoffe, elektronische Bauteile	ja		> 10
FE 13: Kommunikation Vernetzung elektrisch betriebener Bauteile (PROFIBUS)	Verbindung zwischen dem Leitreechner und den Steuerungseinheiten mit der Möglichkeit der manuellen Steuerung	Stahlwerkstoffe, Kunststoffe, elektronische Bauteile	ja	ja	> 10

Tabelle 18: Eigenschaften der Bauteile auf Feldebene

Neben der Auswahl der Betriebsausstattung sind im Sinne der Lebenszyklusphilosophie weitere Überlegungen anzustellen. Diese betreffen hauptsächlich die Auswirkungen auf die Inspektions- und Wartungsarbeiten bzw. den Austausch von Betriebselementen. Um die Beeinträchtigung auf das Verkehrsgeschehen im Tunnel so gering wie möglich zu halten bzw. die Dauer von Tunnelsperrungen zu minimieren, sind in die Wahl der Betriebskomponenten die folgenden Aspekte einzubeziehen:

- genauer Installationsort (Haupttunnelröhre, Notausgang, Betriebsgebäude etc.),
- Erreichbarkeit der Betriebskomponente (ohne/mit Hilfsmittel),
- Maßnahmen zum Schutz von Arbeitern und Verkehrsteilnehmern,
- Einsatz von schwerem Gerät bei Deinstallation oder Austausch der Betriebskomponente benötigt,
- Beschreibung und Dauer der Beeinträchtigung des Verkehrsflusses.

Bevor eine endgültige Auswahl der Betriebskomponente erfolgt, ist zu analysieren, ob alternative Installationsorte existieren, die zu einer Reduktion der oben beschriebenen Aufwendungen und Beeinträchtigungen führen könnten. Nach dem beschriebenen Vorgehen ist während der Rohbauplanung auch die Anordnung von Revisionsöffnungen und -schächten vorzunehmen.

Insbesondere für ÖPP-Projekte, bei denen die Verfügbarkeit von Fahrspuren im Tunnel ein vergütungsrelevantes Element darstellt, sind bauliche und betriebstechnische Alternativen gegeneinander abzuwägen.

4.4 Der Umgang mit risikobehafteten Größen

4.4.1 Schwankungsbereiche von Initial- und Folgekosten

Wie in Abschnitt 3.5.4 ausgeführt und in Tabelle 10 zusammengefasst wurde, verlangt die „Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (HOAI)“ [39] vom Planungsingenieur während der Bearbeitung der einzelnen Leistungsphasen die verbindliche Durchführung von Kostenermittlungen. Die fünf nach DIN 276-1 [50] definierten Stufen der Kostenermittlung werden chronologisch nacheinander durchlaufen und stellen durch den unmittelbaren Kostenvergleich mit dem Ergebnis der jeweils vorangegangenen Stufe gleichzeitig ein Kontrollinstrument dar. Das Vorgehen beruht darauf, dass die sukzessive Fortschreibung der zu erwartenden Kosten auf einer immer breiteren Datengrundlage basiert und sich im Hinblick auf die endgültige Kostensumme ein abnehmender Schwankungs- bzw. Toleranzbereich einstellt. Für den Bauherrn und die ggf. am Projekt beteiligten Investoren drückt sich die planerische Weiterentwicklung durch eine genauere Kostenprognose in Bezug auf den Fertigstellungszeitpunkt aus.

Einige Autoren setzen sich mit ermittelten bzw. tolerierbaren Schwankungsbereichen der Kostenermittlung in Abhängigkeit vom Planungsstand eines Bauprojektes auseinander. Die den einzelnen Stufen der Kostenermittlung zugeordneten Schwankungsbereiche beziehen sich immer auf die endgültigen, also schlussgerechneten Projektkosten. Es sei darauf hingewiesen, dass aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit bei dieser Betrachtung keine Preissteigerungen, Änderungswünsche des Bauherrn oder unvorhersehbare, aber notwendige Planungsänderungen berücksichtigt werden. In Tabelle 19 sind den entsprechenden Leistungsphasen die Stufen der Kostenermittlung nach DIN 276-1 zugeordnet. In der letzten Tabellenspalte sind die Toleranz- bzw. Schwankungsbereiche nach Auswertung der Untersuchungen von Gralla [86], Girmscheid und Motzko [84], Werner und Pastor [169] sowie von Seifert und Preussner [148] wiedergegeben. Zu den in Tabelle 19 aufgeführten Schwankungsbereichen sei angemerkt, dass die genannten Autoren freilich die volle Schwankungsbreite der während ihrer Untersuchungen ermittelten Ergebnisse mitteilen. Mit der Angabe eines extremen Schwankungswerts ist keine Aussage verbunden, die einen Rückschluss auf die Häufigkeit zulässt, mit der dieser Extremwert eintritt. Zudem ist davon auszugehen, dass eine außergewöhnliche Kostenüberschreitung bei einem Bauprojekt der öffentlichen Hand eine hohe Aufmerksamkeit erfährt und Anlass für weitere Untersuchungen auslöst. Extremwerten wird demnach in Publikationen mehr Aufmerksamkeit zuteil, als Werten, die frühere Kostenprognosen bei der Fertigstellung des Bauwerks annähernd bestätigen. Desweiteren kann die Annahme getroffen werden, dass Kostenüberschreitungen seltener als Kostenüberschreitungen eintreten.

Projektphase		Stufen der Kostenermittlung nach DIN 276-1	Schwankungsbereich bzgl. Kostenfeststellung
Bedarfsplanung nach DIN 18205		Kostenrahmen	
Leistungsphase nach HOAI	1. Grundlagenermittlung	---	
	2. Vorplanung	Kostenschätzung	± 30 % (teilw. ± 40 %)
	3. Entwurfsplanung	Kostenberechnung	± 20 % (teilw. ± 25 %)
	4. Genehmigungsplanung	---	
	5. Ausführungsplanung	---	
	6. Vorbereitung/ 7. Mitwirkung bei der Vergabe	Kostenanschlag	± 10 % (teilw. ± 15 %)
	8. Objektüberwachung (Bauüberwachung)	Kostenfeststellung	0
	9. Objektbetreuung/ Dokumentation	---	

Tabelle 19: Stufen der Kostenermittlung mit Angabe von Schwankungsbereichen, nach [53], [50], [39] und mit Daten aus [86], [84], [169], [148]

Auf Grundlage der in Tabelle 19 angegebenen Schwankungs- bzw. Toleranzbereiche ist es erforderlich, dass sich alle Projektbeteiligten darüber bewusst sind, dass eine Kostenermittlung immer abhängig davon ist, zu welchem Zeitpunkt sie durchgeführt wird und auf welchem Planungsstand sie beruht. Um Fehlinterpretationen auszuschließen, sollte eine Kostenermittlung daher immer in Verbindung mit dem Zeitpunkt ihrer Erstellung stehen.

Hinsichtlich der zuvor erläuterten Systematik zur Kostenermittlung und -fortschreibung bei Bauvorhaben lassen sich zwei Schlussfolgerungen formulieren:

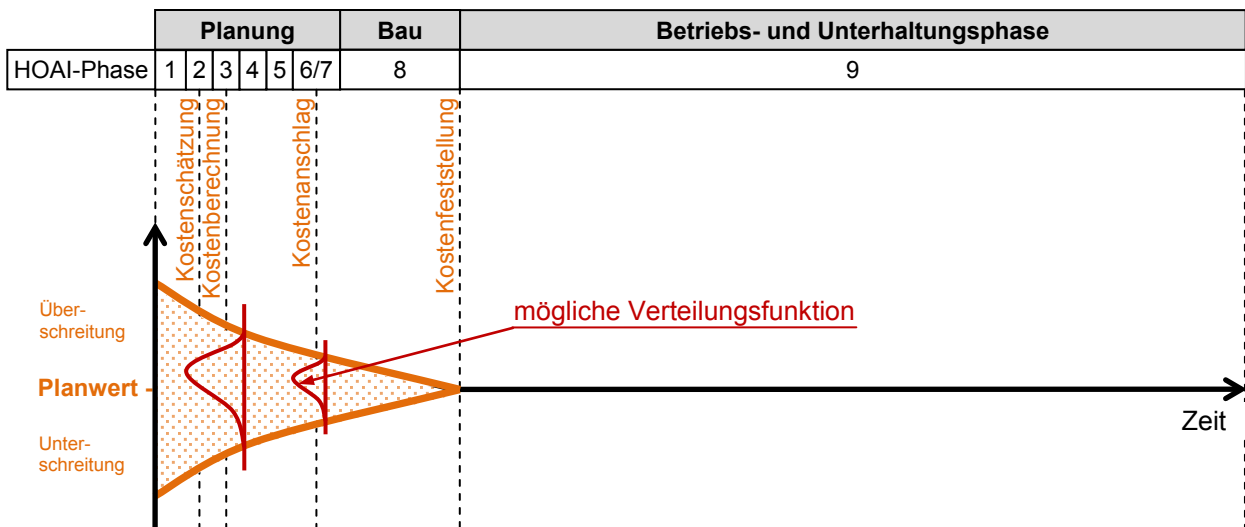
- Sämtliche zuvor dargelegte Stufen der Kostenermittlung umfassen lediglich die Initialkosten und erlauben keinen lebenszykluskostenorientierten Planungsablauf,
- Aus der Höhe der Schwankungsbreite der Initialkosten erwächst die Forderung, dass insbesondere auch bei der Ermittlung der langfristig zu prognostizierenden Folgekosten entsprechende Schwankungsbereiche zu berücksichtigen sind.

Die erste Schlussfolgerung führt zu der Forderung, dass neben den Initial- auch die Folgekosten bei der Projektplanung zu betrachten und kontinuierlich fortzuschreiben sind. Dazu ist es aber erforderlich, dass eine lebenszyklusorientierte Planung zunächst vom Bauherrn initiiert und konsequent weiterverfolgt wird. Der Bauherr oder der spätere Bauwerksbetreiber müssen bedenken, dass Entscheidungen, die nur auf Grundlage der Initialkosten getroffen werden, potenziell anders ausfallen können, als wenn eine Entscheidung unter Einbeziehung der Folgekosten bzw. der Anwendung des Substitutionsprinzips (Abschnitt 3.5.4) getroffen wird. Damit ein Bauwerksplaner mit größter Sicherheit davon ausgehen kann, dass seine Planung schlüssig ist und die beabsichtigten Synergien zwischen (mutmaßlich höheren) Initialkosten und späteren (mutmaßlich geringeren) Folgekosten auch realisiert werden können, muss der Bauherr erkennen, dass der Umfang von Bedarfsplanung und Vorauserkundung im Gegensatz zu einer „konventionellen“ Projektabwicklung gesteigert werden muss. Nicht vollständig verifizierbare Annahmen müssten sonst in einem späteren Planungsprozess revidiert werden, so dass ursprünglich geplante Einsparungspotenziale nicht mehr verwirklicht werden können. Der Leitgedanke der lebenszykluskostenorientierten Planung würde somit außer Kraft gesetzt werden. Elemente einer intensiven Bedarfs- bzw. Grundlagenplanung im Tunnelbau sollten beispielsweise die Vorauserkundung und Beschreibung des Baugrundes, die Einhaltung aktueller Richtlinien und Normen, die Auswahl energieeffizienter Beleuchtungs- oder Belüftungsanlagen sowie die Wahl von Baustoffen mit einer langen technischen Lebensdauer sein.

Es ist offenkundig, dass auch die Folgekosten eine Schwankungsbreite aufweisen. Handelt es sich bei den Initialkosten um Kosten, die innerhalb eines überschaubaren Zeitraumes anfallen – bei Großprojekten allenfalls in der Größenordnung eines Jahrzehnts – so müssen die Folgekosten bei Tunnelbauwerken aufgrund der Langlebigkeit des Rohbaus ggf. über ein Jahrhundert oder länger betrachtet werden. Da sich die Prognosehorizonte über lange Zeiträume erstrecken, ergeben sich noch weitere relevante Aspekte, wie die Entwicklung des Zeitwertes des Geldes und der Einfluss der Preisentwicklung. Diese Größen unterliegen ebenfalls Schwankungen, die in Abschnitt 4.4.5 thematisiert werden.

Abbildung 31 zeigt qualitativ die zeitliche Entwicklung der Schwankungsintervalle für die Initial- und Folgekosten unter Annahme eines auf der Abszisse verlaufenden Planwertes. Während die Größenordnung des Schwankungsbereiches für die Initialkosten aus den in Tabelle 19 angeführten Werten hervorgeht, so ist anzunehmen, dass auch die Folgekosten-Schwankungsbreite ähnliche Werte aufweist. Wenn auch die Folgekosten erst nach Inbetriebnahme des Tunnelbauwerks zum Tragen kommen, müssen sie wegen Ihrer direkten lebenszyklusabhängigen Verknüpfung mit den Initialkosten zwingend bereits während der Planungs- und Bauphase ermittelt werden. Wichtig ist hierbei insbesondere, dass unabhängig von der Höhe der Schwankungen die Initial- und Folgekosten aufeinander abgestimmt sind.

Planwert der Initialkosten mit phasenabhängigem Schwankungsbereich



Planwert der Folgekosten mit phasenabhängigem Schwankungsbereich

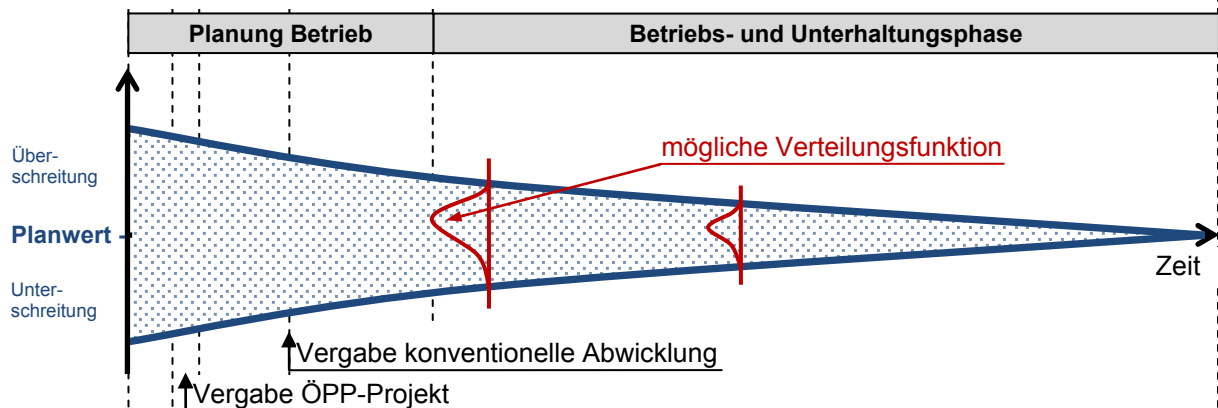


Abbildung 31: Schwankungsbereiche für die Planwerte der Initial- und Folgekosten

Noch ein weiterer Aspekt kann aus Abbildung 31 hergeleitet werden. Während der Bauherr, der die Lebenszykluskosten bei einer konventionellen Projektabwicklung in den Fokus rückt, eigene Planer beauftragt und anleitet, werden bei einem ÖPP-Projekt die Planung, der Bau und die mehrjährige Betriebsphase frühzeitig

an einen Unternehmer bzw. Konzessionsnehmer weitergegeben. Aus Abbildung 31 wird ersichtlich, dass zum Zeitpunkt der Konzessionsvergabe die Schwankungsintervalle für die Initial- und Folgekosten eine größere Amplitude besitzen als für den Vergabezeitpunkt der Bauleistung bei konventioneller Projektentwicklung. Um dennoch eine Vorteilhaftigkeit des Betreibermodells gegenüber der konventionellen Abwicklung darstellen zu können, werden Instrumente benötigt, Risiken vor dem Vertragsabschluss valide einzuschätzen.

4.4.2 Unsicherheit und Unschärfe als risikobestimmende Parameter

In Abschnitt 3.1 wurde der Lebenszyklusbegriff zunächst auf seine biologische Bedeutung zurückgeführt und im Anschluss daran auf Objekte übertragen. Blohm und Lüder [9] fragen in diesem Zusammenhang, „ob man, wie beim Organismus, auch zwischen Gesundheit und Krankheit [...] unterscheiden kann und ob es möglich ist, für die Krankheiten Therapien anzugeben, die über den Einzelfall hinausgehend erfolgsversprechend sind“. Die Verfasser bejahen in [9] diese Frage und bringen Krankheiten mit Schwachstellen in den Methoden der Investitionsrechnung in Verbindung. Dabei werden Krankheitsmerkmale als die Schwachstellenbeschreibung, die Diagnose als die Schwachstellenanalyse und die Therapie als die Schwachstellenbeseitigung aufgefasst. In dieser Arbeit sollen Schwachstellen durch die Bezeichnungen „Unsicherheit“ und „Unschärfe“ beschrieben werden.

Die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen, etwa die zeitabhängige Prognose der Kosten und Einnahmen beim Betrieb eines Bauwerks oder die Abschätzung von Leistungsansätzen beim Bau eines Tunnels, sind stets mit Ungewissheit verbunden. Ungewissheiten können einerseits mit Hilfe der Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung beschrieben, andererseits durch unpräzise oder vage Formulierungen ausgedrückt werden. Die maßgeblichen Parameter, die Einfluss auf die Einschätzung einer zukünftigen Entwicklung ausüben, müssen sorgfältig identifiziert und eingehend bewertet werden. Für den Betrieb eines Straßentunnels sind bei der Durchführung einer derartigen Einflussanalyse beispielsweise die im Folgenden genannten Aspekte zu berücksichtigen:

- Genauigkeit der Einschätzung von Nutzungsdauern für Rohbau und Ausrüstung,
- Umfang, den eine Datenstichprobe zur Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit eines technischen Bauteils aufweist,
- Auswirkung von Inspektions- und Instandhaltungsstrategien und -rhythmen,
- Umwelteinflüsse, denen ein Bauteil dauerhaft oder kurzfristig ausgesetzt ist,
- der spezifische Erfahrungsschatz, über den ein Bauwerksbetreiber verfügt.

Da der Oberbegriff der Ungewissheit sehr weit gefasst ist, muss zunächst eine weitere Konkretisierung durch die Definition der Begrifflichkeiten „Unsicherheit“ und „Unschärfe“ vorgenommen werden.

Nach Ocker [129] ist Unsicherheit in „einer Entscheidungssituation gegeben, wenn ein Betrachter nicht über die quantitativ und qualitativ adäquaten Informationen bezüglich eines (Entscheidungs-)Systems verfügt, um dieses, sein Verhalten oder andere seiner Eigenschaften deterministisch und numerisch beschreiben oder voraussagen zu können“. Nach Hauptmanns und Werner [94] und Knetsch [111] existieren zwei Arten von Unsicherheiten, die auf (Entscheidungs-)Systeme einwirken. Es handelt sich hierbei um aleatorische (zufallsabhängige) und epistemische (wissensabhängige) Unsicherheiten.

Aleatorische Unsicherheiten entstehen aus zufällig auftretenden Prozessen bzw. Ereignissen und unterliegen einer stochastischen Streuung. Übertragen auf den Betrieb eines Straßentunnels ist der Ausfall einer technischen Ausstattungskomponente – beispielsweise die messtechnische Erfassung der Sichttrübung im Tunnel – mit aleatorischen Unsicherheiten verknüpft, da der Zeitpunkt des Funktionsausfalls ein zufälliger Prozess ist.

Im Gegensatz dazu beschreiben epistemische Unsicherheiten Zustände, die aus unvollständigem Wissen resultieren. Ist zum Beispiel die Funktion zur Messung der Luftströmungsgeschwindigkeit ausgefallen und der Tunnelbetreiber darüber bereits in Kenntnis gesetzt, so drückt sich die epistemische Unsicherheit dadurch aus, dass bezüglich des Schadens zunächst Unsicherheit besteht. Die anschließende Ermittlung des genauen Schadensbildes bietet die Chance, nachhaltige Informationen zu sammeln: Nach Ausführungen von Straub [152] stellt die Schadensanalyse für den Hersteller ein effizientes Mittel dar, Bauteile technisch weiterzuentwickeln und den Grad der Unsicherheit gegenüber zukünftigen Ausfällen zu verringern. Um das Beispiel erneut aufzugreifen, profitiert der Tunnelbetreiber zwar zu einem späteren Zeitpunkt von der technischen Weiterentwicklung des Messgeräts, zum Zeitpunkt des Ausfalls muss der Betreiber diesen allerdings akzeptieren und eine Schadensbehebung einleiten. Es wird daraus ersichtlich, dass aleatorische Unsicherheiten in den Fokus der weiteren Betrachtungen rücken. Ist über die gesamte zu betrachtende Lebenszyklusdauer zu erwarten, dass aufgrund von epistemischen Unsicherheiten Fortschritte bei der Weiterentwicklung von Anlagen und Bauteilen eintreten, ist dies entsprechend zu berücksichtigen.

Unschärfe liegt nach Ocker [129] in „einer Entscheidungssituation vor, wenn ein Betrachter nicht über die quantitativ und qualitativ adäquaten Informationen bezüglich eines (Entscheidungs-)Systems verfügt, um dieses, sein Verhalten oder andere seiner Eigenschaften präzise und eindeutig beschreiben oder voraussagen zu können“. Unschärfe wird durch verbale Beschreibungen ausgedrückt, beispielweise dadurch, dass in Tunnelportalnähe unter dem Einfluss von Frost-Tauwechseln oder einer sich rasch verändernden Luftfeuchte die Nutzungsdauer eines Leuchtdichtemessgeräts im Vergleich zur Platzierung im Tunnelinneren gering ist. Die verbale Einschätzung, die durch das Adjektiv „gering“ suggeriert wird, ist zunächst nicht weiter quantifizierbar, eine Nicht-Beachtung hätte jedoch wirtschaftliche Konsequenzen. Derartige Unschärfen müssen im Zuge der Erfassung aleatorischer, also stochastischer Unsicherheiten, Berücksichtigung finden.

Anhand der gegebenen Erläuterungen lässt sich vorläufig zusammenfassen, dass jedes Bauteil versagen wird, jedoch bezüglich Zeitpunkt und Art des Schadens Unsicherheit herrscht. Zudem ist Unschärfe mit der Fragestellung verbunden, wie sich identische Bauteile unter variierenden Umwelteinflüssen verhalten. Neben der zuvor beispielhaft herausgegriffenen Bauteilebene sind auch die in das Lebenszykluskostenmodell zu implementierenden Kosten mit Unsicherheiten und Unschärfen behaftet. Für die Parameter Bauteil und Kosten sind in Tabelle 20 exemplarische Unsicherheiten und Unschärfen aufgeführt, die bei einer Lebenszykluskostenanalyse nach Vogt und Thewes [165] zu berücksichtigen sind.

	Bauteil	Kosten
Unsicherheit – basiert auf der empirischen Wahrheit einer Information	<u>Aleatorische Unsicherheit</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitpunkt, zu dem der Bauteilschaden eintritt <u>Epistemische Unsicherheit</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Art des Bauteilschadens ▪ Umfang des erforderlichen Bauteilaustauschs ▪ Verfügbarkeit von Ersatzteilen 	<u>Aleatorische Unsicherheit</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitpunkt und Höhe der Kosten für Instandhaltung und Bauteilaustausch ▪ Energiekosten <u>Epistemische Unsicherheit</u> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Inflationseinflüsse ▪ Zeitwert des Geldes (Wahl eines Kapitalzinssatzes)
Unschärfe – basiert auf dem Inhalt und der Präzision einer Information	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Identische Bauteile weisen in Abhängigkeit von den einwirkenden (Umwelt-)Einflüssen eine höhere oder geringere Lebensdauer auf 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gleichwertige Konkurrenzprodukte verursachen unterschiedliche Kosten

Tabelle 20: Beispiele für Unsicherheit und Unschärfe in der Lebenszykluskostenanalyse

Unsicherheit und Unschärfe können nach Ocker [129] als zwei komplementäre Aspekte einer Entscheidungssituation angesehen werden. Unvollständige Informationen liegen im Rahmen dieser Arbeit vor, wenn die Informationen bezüglich eines Entscheidungssystems unsicher, unscharf oder beides zugleich sind.

Ist ein Prozess oder ein Ereignis mit Unsicherheiten behaftet, so folgen nach Straub [152] Konsequenzen, die als Risiko bezeichnet werden. Da hierbei der Einfluss der Unschärfe nicht berücksichtigt wird, soll zur weiteren Präzisierung auf die Definition des Risikobegriffes nach Knight [112] zurückgegriffen werden.

Knight führt an, dass Risiken sich anhand ihrer Quantifizierbarkeit von Ungewissheiten unterscheiden lassen. Darüber hinaus weist Knight [112] darauf hin, dass Risiken Anteile enthalten, die messbar, quantifizierbar und definiert sind, ihnen aber Ungewissheiten von unberechenbarer Natur innewohnen, die sich nicht messen bzw. quantifizieren lassen und daher nicht definierbar sind.

Zudem differenziert Ocker [129] zwischen zwei Auffassungen, die mit der Bedeutung des Risikobegriffs verbunden sind. Das informatorische, ursachbezogene Begriffsverständnis geht davon aus, dass Risiko durch seine Ursache charakterisiert wird, also auf die zugrundeliegende Unsicherheit künftiger Entwicklungen. Dieses Risikoverständnis basiert auf einer entscheidungstheoretischen Perspektive von Unsicherheit und stellt heraus, dass dieses grundsätzlich im Rahmen einer Entscheidungssituation auftritt. Eine Risikosituation stellt dabei eine besondere Unsicherheitssituation dar, welche sich dadurch auszeichnet, dass eine Quantifizierung der Unsicherheit in Form von Wahrscheinlichkeiten möglich ist. Ergänzend hierzu ist nach Straub [152] das Risiko der Erwartungswert der Konsequenz. Für den Fall, dass ein einzelnes Ereignis E mit der Wahrscheinlichkeit $Pr(E)$ und der Konsequenz $c(E)$ betrachtet wird, ist der Erwartungswert und somit das Risiko R des Ereignisses E definiert als $R(E) = Pr(E) * c(E)$.

Auch in den Ingenieurwissenschaften wird das Risiko meist in Anlehnung an DIN 820-120 „Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen“ [51] als Produkt der Wahrscheinlichkeit eines Schadenseintrittes und seines Schadensausmaßes aufgefasst. Dabei ist die Bandbreite, das Risiko auszudrücken sehr weit gefasst und reicht beispielsweise von Überflutungs- oder Versagenswahrscheinlichkeiten bis zur Angabe von Fatalitätsraten.

Das wertende, wirkungsbezogene Begriffsverständnis zielt nach Ocker [129] dagegen auf die negative ökonomische Wirkung des Risikos ab. Betont wird dabei die Möglichkeit des Misslingens von Plänen, die Gefahr von Fehleinschätzungen und damit verbunden das Eintreten von Zielabweichungen. Nach Sandoval-Wong [144] kann ergänzt werden, dass Risiken möglicherweise auftretende Faktoren sind, aus denen, wenn sie eintreten, Zielabweichungen mit positiven oder negativen Ergebnissen folgen können. Eine positive Abweichung ist als Chance anzusehen, während eine negative Abweichung eine Gefahr darstellt.

Grundsätzlich besteht das Bestreben, Risiken soweit wie möglich zu minimieren und sich abzeichnende Chancen zu nutzen. Jedoch ist diese Ziel nur dann erreichbar, wenn unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte ein bestimmtes Restrisiko toleriert wird. In der subjektiven Wahrnehmung wird ein Risiko jedoch immer einen höheren Stellenwert als eine Chance vergleichbaren Umfangs einnehmen. Jeder Entscheidungsträger wird daher individuell festlegen müssen, welches Restrisiko im speziellen Betrachtungsfall für ihn gerade noch tolerierbar ist.

4.4.3 Unsicherheiten im Zuge der Modellbildung

Wie Kruschwitz [116] ausführt, ist „die Fähigkeit des Menschen, bereits heute zu erkennen, was in der Zukunft geschehen wird, in der Regel sehr beschränkt“. Des Weiteren wird unter Experten, so weiter in [116], die Meinung vertreten, dass „die eigentliche Problematik der Investitionsrechnung deswegen auch gar nicht in der Rechnung selbst, sondern in der Beschaffung der Daten für die Rechnung“ liegt.

Sämtliche Größen, die vor Beginn der Lebenszykluskostenanalyse zu ermitteln und zusammenzustellen sind, zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit Unsicherheiten behaftet sind. Wie in Abbildung 32 dargestellt, ist das Ergebnis einer Lebenszykluskostenanalyse als Folge unsicherer Eingangsdaten stets risikobehaftet. Wird unterstellt, dass die Unsicherheitsgrade der Eingangsgrößen nicht wesentlich beeinflussbar sind, so ergibt sich die Forderung, dass bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse die in die Berechnung einfließenden Unsicherheiten auf jeden Fall einbezogen werden müssen.

Die Interpretation der Berechnungsergebnisse macht die Differenzierung nach zwei Fällen erforderlich: Für das in Abbildung 32 mit Fall 1 bezeichnete Berechnungsergebnis ist davon auszugehen, dass sich die Risi-

ken innerhalb beherrschbarer Grenzen bewegen, da die Unsicherheiten der Eingangsgrößen vorab eingehend untersucht wurden. Zeichnet sich hingegen die in Abbildung 32 unter Fall 2 aufgeführte Situation ab, so ist das mit dem Ergebnis verbundene Risikoausmaß gänzlich unbekannt. Für diesen zweiten Fall stellt sich erst mit der Durchführung von Soll-/Ist-Vergleichen heraus, in welchem Umfang Fehleinschätzungen zu einem früheren Zeitpunkt getroffen wurden. Wird die Kluft zwischen Soll- und Istwerten im Sinne negativer Konsequenzen zunehmend größer, so ist davon auszugehen, dass dieser Trend über die verbleibende Lebenszyklusdauer nicht mehr zu korrigieren ist. Die Zielstellung der lebenszyklusorientierten Sichtweise wird somit im zweiten Fall nicht erfüllt.

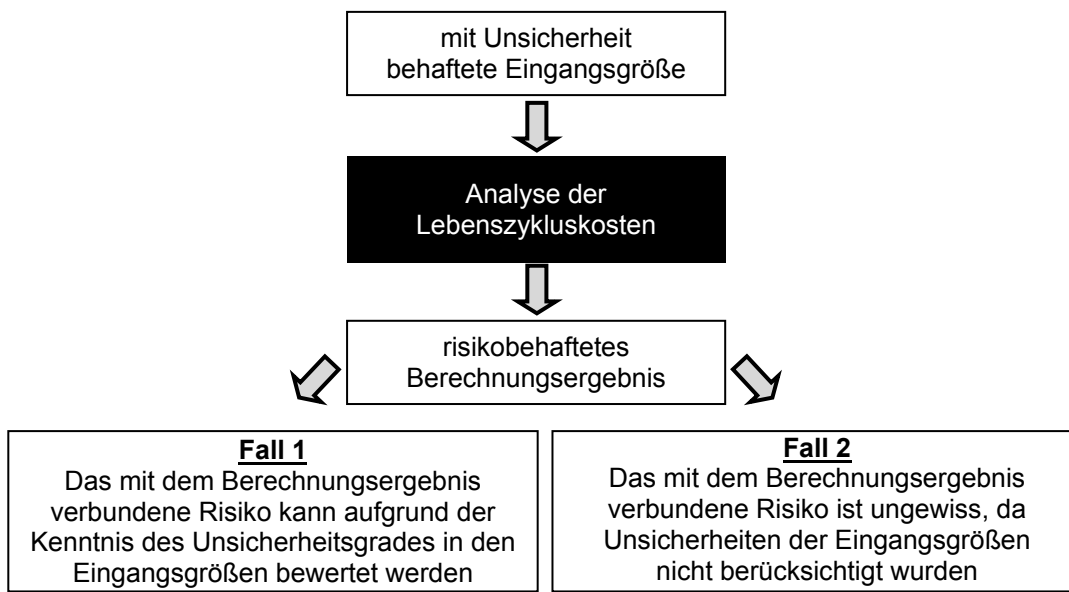


Abbildung 32: Auswirkungen von Unsicherheiten auf das Risiko der Lebenszykluskostenanalyse

Aus den vorangegangenen Ausführungen geht deutlich hervor, dass ein Lösungsweg entwickelt werden muss, der die Beurteilung von Eingangsgrößen hinsichtlich ihres Unsicherheitspotentials berücksichtigt. Wie Straub [152] argumentiert, kann das Verhalten eines Systems genau dann vorhergesagt werden, wenn die Wirklichkeit perfekt abbildet wird und sämtliche Eingangsgrößen dezidiert bekannt sind. Derartig ideale Voraussetzungen liegen jedoch bei der Lebenszykluskostenanalyse nicht vor, so dass Annahmen, die die Komplexität des Systems vereinfachen, zu treffen sind. Die geeignete Wahl von Vereinfachungen führt dazu, dass die Realität unter Zuhilfenahme idealisierter Modellvorstellungen abgebildet wird. Es müssen also Modelle entwickelt werden, die die zur Verfügung stehenden Daten realitätsnah weiterverwerten.

Die Abbildung 33 zeigt das schrittweise Vorgehen bei der Generierung von unsicherheitsbehafteten Eingangsdaten, wenn für die gesuchten Werte auf eine Datenhistorie zurückgegriffen werden kann. Nach Darstellung von Möller und Reuter [125] umfasst eine Datenhistorie eine Zeitreihe von Werten, die in einer chronologisch geordneten Abfolge protokolliert werden. Jedem Wert ist dabei genau eine bestimmte Beobachtungszeit zugeordnet. Bei der Generierung zukünftiger Daten muss hingegen auf Grundlage einer möglicherweise unvollständigen Datenhistorie eine valide Basis zur Abschätzung zukünftiger Datenpunkte geschaffen werden. Dabei sind alle Randbedingungen, die Einfluss auf die Höhe künftiger Daten ausüben, zu identifizieren und zu bewerten.

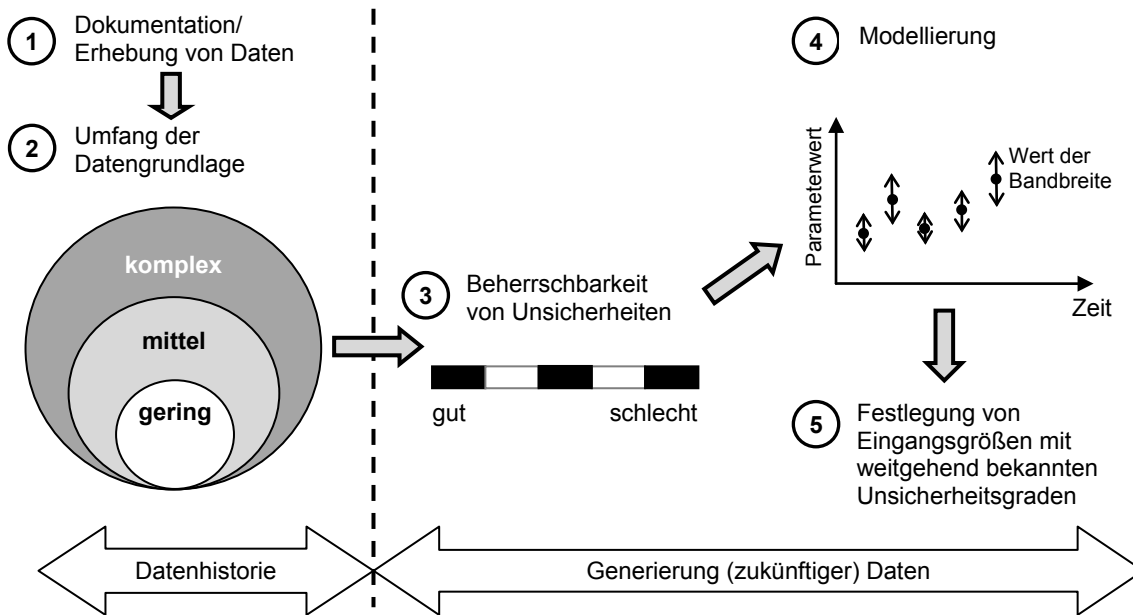


Abbildung 33: Systematik zur Generierung zukünftiger Daten auf Grundlage einer Datenhistorie

Zunächst besteht die Aufgabe also darin, unsichere Werte, die Eingang in die Lebenszykluskostenanalyse finden, qualitativ zu beschreiben (Abschnitt 4.4.4). Im nächsten Schritt erfolgt die Entwicklung von Modellen, die es erlauben, quantitative Vorgaben unter Berücksichtigung von Unsicherheiten abzubilden (Abschnitt 4.4.5). Im Anschluss daran werden die Eingangsgrößen in die Lebenszykluskostenanalyse implementiert sowie die Berechnungsergebnisse interpretiert (Kapitel 5).

4.4.4 Identifizierung der mit Unsicherheiten behafteten Parameter

Die im Zusammenhang mit der Bauplanung und der Bauerstellung stehende Leistungserbringung ist mit hohen Erstinvestitionskosten verbunden und erfolgt für Tunnel über den Zeitraum einiger weniger Jahre. Im Gegensatz dazu zeichnen sich die Folgekosten für Betrieb und Instandhaltung dadurch aus, dass sie – abgesehen von den Kosten für einzelne größere Instandhaltungsmaßnahmen – in etwa vergleichbarer Größenordnung über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten anfallen.

Sowohl Initial- als auch Folgekosten unterliegen, wie in Abbildung 31 veranschaulicht wurde, Schwankungen. Dennoch werden beim Umgang mit Unsicherheiten für beide Kostenarten unterschiedliche Ansätze verfolgt, die nähere Erläuterungen erforderlich machen: Wie in Abschnitt 3.3.2 erörtert wurde, besitzt die Anwendung der Lebenszyklusphilosophie dann das höchste Potenzial für Kosteneinsparungen, wenn sie bereits ab der Planungsphase für ein Neubauprojekt Anwendung findet. Aus diesem in Abschnitt 3.3.2 mit Szenario 1 bezeichneten Vorgehen resultiert ein optimaler Entwurf, der in Einklang mit einer charakteristischen Initialkostensumme steht. Genau diese Initialkostensumme wird in die Lebenszyklusanalyse implementiert und bildet den zeitlichen Ausgangspunkt für die kostenmäßige Betrachtung des gesamten Lebenszyklus. Somit lässt sich der Stellenwert der Initialkosten in einer Lebenszykluskostenanalyse wie folgt charakterisieren:

- Die Initialkosten, die auf Grundlage des Lebenszykluskonzeptes kalkuliert werden, können zwar von der Höhe her die Initialkosten, die für eine konventionelle, also nicht lebenszykluskosten-orientierte Abwicklungsform errechnet werden über- oder unterschreiten, das zugrunde liegende Kalkulationsverfahren ist aber in beiden Fällen identisch,

- Im Fall eines Neubauprojektes (Szenario 1) repräsentiert der Zeitpunkt der Bauwerksfertigstellung den Beginn des Analysezeitraums. Exakt zu diesem Zeitpunkt werden die Initialkosten in die Lebenszykluskostenberechnung implementiert. Dieser Zeitpunkt übernimmt den Stellenwert des Referenzzeitpunktes, auf den sich die Lebenszykluskostenberechnungen sämtlicher alternativer Entwürfe beziehen. Daraus lässt sich ableiten, dass die Initialkosten nicht in Barwerte umzurechnen sind und den Charakter realer Preise darstellen. Sämtliche Leistungen hingegen, die nach der Fertigstellung des Bauwerks erbracht werden, sind Folgekosten und werden als Barwerte auf den Referenzzeitpunkt abgezinst.
- Erfolgt die Lebenszykluskostenanalyse für ein Bestandsbauwerk – hierbei handelt es sich um das in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Szenario 2 – so wird die Implementierung von Initialkosten nur dann erforderlich, wenn der Beginn der Lebenszykluskostenanalyse mit einer Anfangsinvestition (vgl. Kurve A in Abbildung 27) beginnt; anderenfalls umfasst die Lebenszyklusanalyse nur Folgekosten.

Es lässt sich das Fazit ziehen, dass Initialkosten nur zu Beginn des Analysezeitraums in die Lebenszykluskostenberechnung einfließen. Sämtliche Kosten, die aus den Initialkosten resultieren, werden als Folgekosten aufgefasst und im Zuge der Anwendung der Investitionsrechnung auf den Zeitpunkt, zu dem die Initialkosten berücksichtigt werden, abgezinst. Unsicherheiten, die mit den Initialkosten in Verbindung stehen, werden somit nur in Abhängigkeit davon berücksichtigt, in welcher Planungsphase sich das Projekt befindet. Für die Lebenszykluskostenanalyse besteht die Möglichkeit, eine Bandbreite für die Initialkosten, die Ausdruck unsicherer Eingangswerte sind, anzugeben. Die Größenordnung der Bandbreite geht aus den in Tabelle 19 genannten Werten hervor und ist in Einklang mit der Planungsstufe, die ein Projekt gegenwärtig durchläuft, zu wählen. Die Abbildung 34 fasst das zuvor beschriebene Vorgehen für die Szenarien 1 und 2 zusammen.

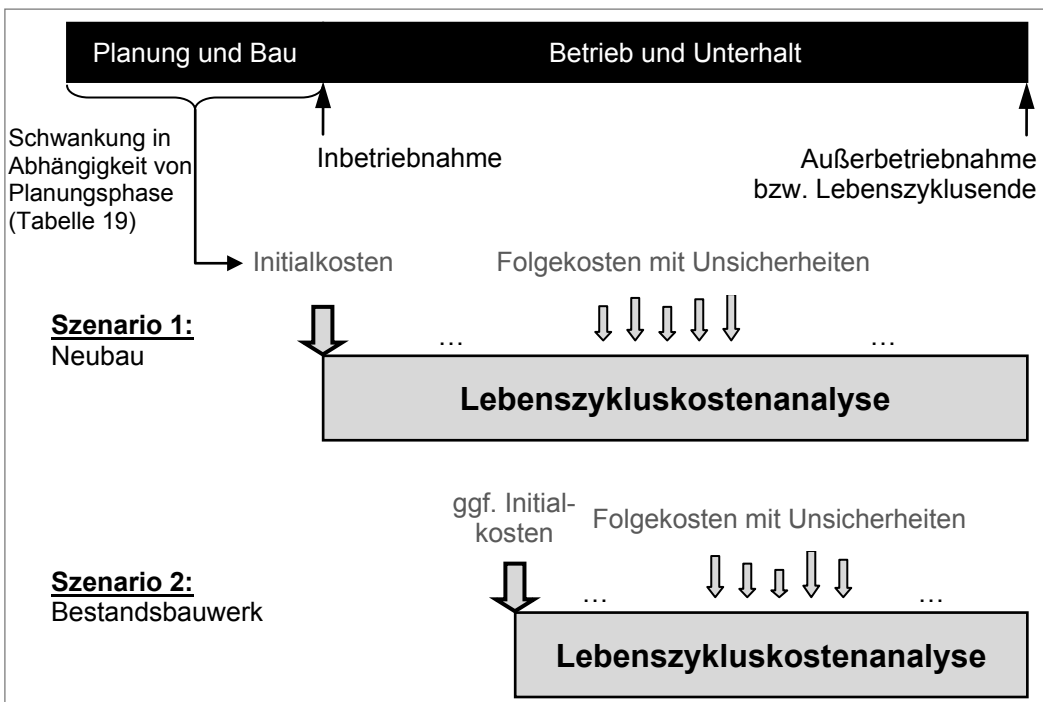


Abbildung 34: Schema der Initial- und Folgekosten bei der szenarioabhängigen Lebenszykluskostenanalyse

Die Entwicklung der Folgekosten wird durch mehrere Parameter beeinflusst. Jeder Parameter lässt sich einer der folgenden drei Gruppen zuordnen:

- Gruppe 1 umfasst die theoretische Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen,
- Gruppe 2 enthält Kostenansätze für die Installation sowie die Instandhaltung von Baustoffen und Bauteilen,

- Gruppe 3 beinhaltet die Festlegung von Rahmenbedingungen, die aus der Anwendung dynamischer Investitionsrechnungsverfahren resultieren.

Jede Gruppe beinhaltet eine oder mehrere Größen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Aufgrund der Verschiedenheit der gruppenspezifischen Eingangsgrößen sind für jede Gruppe separate Modellansätze zu erarbeiten. Welche Parameter maßgeblichen Einfluss auf die Festlegung der Eingangsgrößen innerhalb einer Gruppe ausüben, ist in Tabelle 21 aufgeführt. In der rechten Tabellenspalte ist zudem angegeben, welche Quellen zur Beschaffung von Daten heranzuziehen bzw. welche Projektbeteiligten in den Entscheidungsprozess zur Festlegung geeigneter Größenordnungen einzubeziehen sind.

	unsichere Eingangsgröße	Einflussparameter	Basis der Datenbeschaffung
Gruppe 1	Theoretische Nutzungsdauer eines Bauteils/Baustoffs	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <u>technischer Ausfall</u> Früh-, Zufalls-, Spätausfall (Verschleiß, Korrosion, Alterung) ▪ <u>außerplanmäßig-vorzeitiger Ausfall</u> Zerstörung (Unfall, Terror, Naturkatastrophe) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfahrung (Planer, Betreiber) ▪ statistische Ausfallwahrscheinlichkeit ▪ Herstellerangaben ▪ Normen, Richtlinien, Empfehlungen
Gruppe 2	Kosten	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschaffung, Einbau, Wiederbeschaffung, Aus- und Wiedereinbau ▪ Wartungs- und Inspektionskosten ▪ Betriebsstoffkosten (Energie, Gas, Wasser) ▪ Preisentwicklung (Inflation, Wettbewerb, Konjunktur etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erfahrung (Betreiber, Planer) ▪ Herstellerangaben ▪ Richtlinien ▪ Zeitreihen (Indizes)
Gruppe 3	Finanzmarkt	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zeitwert des Geldes ▪ Laufzeit Verzinsung und Tilgung von fremdgeliehenem Kapital 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bedingungen Kapitalmarkt

Tabelle 21: Übersicht der mit Unsicherheit behafteten Eingangsgrößen

Separat nach ihrer Gruppenzugehörigkeit werden die in Tabelle 21 aufgeführten Unsicherheiten in den folgenden Absätzen qualitativ beschrieben. Die Ansätze, die den Umgang mit Unsicherheiten aus der quantitativen Perspektive ermöglichen, sind hingegen Inhalt von Abschnitt 4.4.5.

Gruppe 1: Theoretische Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen

Die Definition der theoretischen Nutzungsdauer von Baustoffen und Bauteilen, die im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommt, wurde bereits in Abschnitt 3.4.3 eingeführt und anhand der Abbildung 22 grafisch illustriert. Demzufolge bestimmt der Abbau des Abnutzungsvorrates das Ende der theoretischen Nutzungsdauer. Wird die Abnutzungsgrenze erreicht, so ist der vollständige Austausch einer Betrachtungseinheit erforderlich. Der Verlauf des Abbauprozesses gestaltet sich für jeden Baustoff bzw. für jedes Bauteil individuell und ist auch für identische Baustoffe und Bauteile nicht in genau gleicher Weise reproduzierbar. Wird davon ausgegangen, dass identische Bauteile unter gleichen Bedingungen gefertigt werden, wird der Abbau des Abnutzungsvorrates im Tunnel durch die funktionserfüllende Nutzungsintensität einerseits und durch sonstige reguläre und außergewöhnliche Einwirkungen andererseits verursacht. Wie in Tabelle 21 gezeigt, wird zwischen dem technischen und dem außerplanmäßig-vorzeitigen Ausfall unterschieden. Während der technische Ausfall früh, zufällig oder durch Verschleiß- bzw. Ermüdung in einer späten Nutzungsphase auftreten kann, zeichnet sich der außerplanmäßig-vorzeitige Ausfall dadurch aus, dass aufgrund eines plötzlichen Abbaus ohne vorherige Ankündigung die Abnutzungsgrenze erreicht wird. Einflüsse, die ein plötzliches Ver-

sagen nach sich ziehen, werden durch außergewöhnliche Ereignisse im Tunnel hervorgerufen und können durch einen Großunfall, einen terroristischen Akt oder durch eine Naturkatastrophe ausgelöst werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Ereignissen, die einen außerplanmäßig-vorzeitigen Ausfall markieren, sind nach Untersuchungen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens SKRIBT [162] angestellt wurden, äußerst gering. Treten sie hingegen auf, ist das Ausmaß von immenser Reichweite und kann bis zum Verlust des gesamten Bauwerks führen. Aufgrund der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten sind die Voraussetzungen, außerplanmäßig-vorzeitige Einflüsse in die Lebenszykluskostenanalyse eines Straßentunnels einzubeziehen, hingegen nicht zu rechtfertigen. Im Übrigen kann davon ausgegangen werden, dass eine Schadensregulierung – abgesehen von Krieg und Terror – ganz oder teilweise durch einen entsprechenden Versicherungsschutz abgedeckt ist.

Die Unsicherheit, die von der technischen Nutzungsdauer eines Bauteils ausgehen kann, soll anhand eines einfachen Beispiels verdeutlicht werden: Aufgrund der statischen Robustheit des Rohbaus soll für das Tunnelbauwerk A eine Lebenszykluskostenanalyse über einen Zeitraum von 100 Jahren durchgeführt werden. Während dieser Zeit wird für das willkürlich ausgewählte Bauteil „A.15“ gefordert, dass es die volle Funktionsfähigkeit aufweist. Die theoretische Nutzungsdauer des Bauteils A.15 wird auf 25 Jahre festgelegt, so dass nach der Erstinstallation zum Zeitpunkt „Null“ drei Austauschvorgänge einzuplanen sind. Auf Grundlage der theoretischen Nutzungsdauer ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Bauteil A.15 in den Jahren 25, 50 und 75 ausgetauscht werden muss, stochastisch gesehen am größten. Mit dem prognostizierten Bauteilaustausch geht die Konsequenz einher, dass das Bauteil unter Beachtung der Austauschkosten wiederbeschafft werden muss. Wird die Wahl der theoretischen Nutzungsdauer von 25 Jahren für das Bauteil A.15 ohne kritische Prüfung akzeptiert, so beinhaltet diese Annahme eine nicht näher zu quantifizierende Unsicherheit. Wird nun im Weiteren angenommen, dass der Lebenszyklus für das Bauteil A.15 für drei Zyklen genau 25 Jahre beträgt, einmal jedoch lediglich eine Funktionsdauer von 20 Jahren erreicht, so erhöht sich die Anzahl der erforderlichen Austauschvorgänge von drei auf vier. In Abhängigkeit von der Kostenhöhe, die durch den Austausch des Bauteils A.15 hervorgerufen wird, kann dies Auswirkungen auf das Ergebnis der Lebenszykluskostenanalyse haben.

Das Prinzip des zuvor exemplarisch erläuterten Zusammenhangs ist in Abbildung 35 dargestellt. Daraus wird ersichtlich, dass neben der Unsicherheit, die aus der theoretischen Nutzungsdauer erwächst, auch die Abschätzung der Kosten zum Austausch des Bauteils mit Unsicherheiten behaftet ist. Auch dieser zweite Einfluss wird in Abbildung 35 spezifiziert: Während die Initialkosten zur Installation des Bauteils genau angegeben werden können, weisen die Folgeaustauschkosten Schwankungen auf, welche in Abbildung 35 durch vertikale Pfeile, denen ein Plus- oder Minuszeichen hinzugefügt ist, symbolisiert sind.

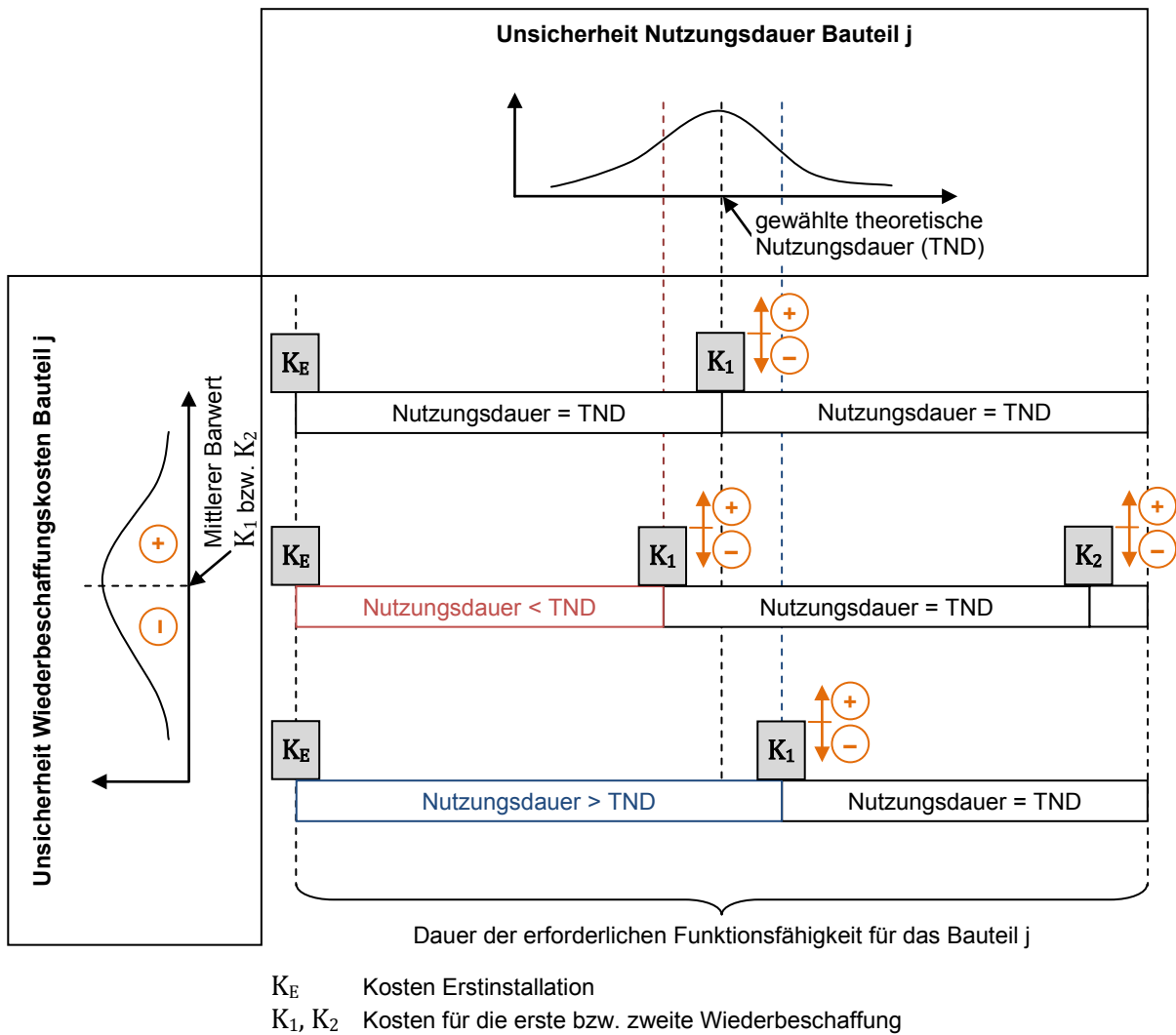


Abbildung 35: Verknüpfung der Unsicherheiten aus der Bauteillebensdauer und den Kosten zum Austausch des Bauteils j

Neben den zuvor betrachteten Austauschkosten fallen über den Zeitraum, in dem ein Bauteil seine Funktion erfüllt, Kosten zur Instandhaltung an. In enger Anlehnung an die Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung [32] wird für die Lebenszykluskostenanalyse im Rahmen dieser Arbeit die Strategie verfolgt, den jährlichen Instandhaltungsaufwand als prozentualen Anteil der Ersterstellungskosten auszudrücken. Im Weiteren besteht optional die Möglichkeit, diesen Anteil mit zunehmender Nutzungsdauer des Bauteils zu erhöhen. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass mit zunehmendem Abbau des Abnutzungsvorrates die Instandhaltungsmaßnahmen umfangreicher und somit kostenintensiver werden.

Die technische Lebensdauer eines Bauteils soll unter Verknüpfung der aus der Funktionserhaltung resultierenden Kosten noch einmal aus einer anderen Sichtweise betrachtet werden. Wie Degenhard [42] ausführt, ist ein Mittel zur Minderung des Ausfallrisikos eines Bauteils die Schaffung entsprechender Sicherheiten. Dies ist möglich, indem:

- ausreichende Sicherheitsfaktoren berücksichtigt werden,
- Redundanzen geschaffen werden,
- regelmäßig Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Die Kombination dieser drei Schritte kann jedoch auch dazu führen, dass ein unverhältnismäßig hoher finanzieller Aufwand hervorgerufen wird, Bauteile in ihrer Funktionstüchtigkeit zu erhalten. Insbesondere im Sinne

einer lebenszyklusorientierten Sichtweise ist aber, wie in Abschnitt 3.4.2 erläutert, zwischen der wirtschaftlichen und der technischen Lebensdauer zu differenzieren. Danach ist die ökonomisch sinnvolle Lebensdauer kürzer als die technische Lebensdauer. In Abbildung 36 wird dargelegt, welcher Zusammenhang zwischen der mit dem optimalen Ausfallrisiko korrelierenden theoretischen Nutzungsdauer und den Gesamtkosten zur Herstellung eines Bauteils besteht. Dazu werden sowohl die Herstellkosten als auch die risikobasierenden Kosten (Instandhaltung, Betriebsausfall etc.) über das auf der Abszisse dargestellte Ausfallrisiko aufgetragen. Aus der Summierung der beiden Kurven folgt die dem Ausfallrisiko zugeordnete Gesamtkostenkurve für das betrachtete Bauteil. Die resultierende Summenkurve weist ein Minimum auf, welches aus wirtschaftlicher Sicht dem optimalen Ausfallrisiko entspricht.

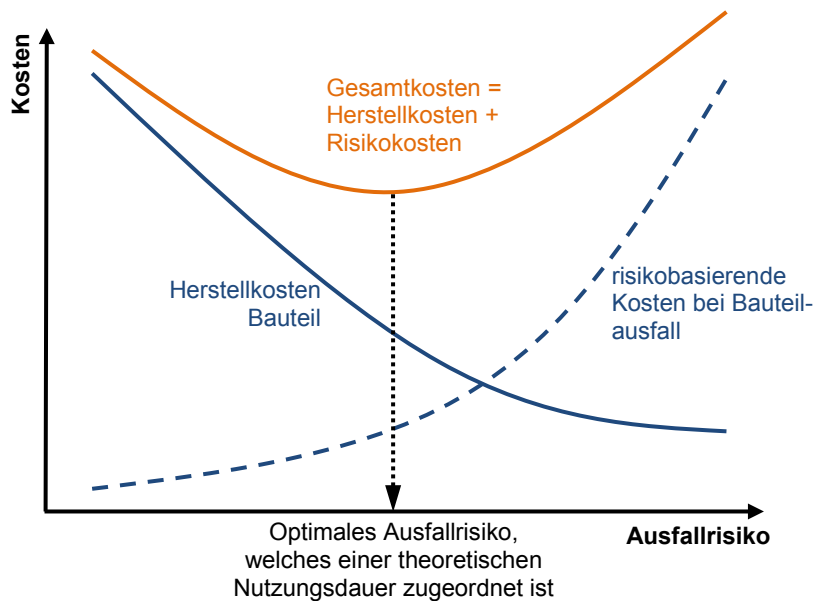


Abbildung 36: Zusammenhang zwischen Ausfallrisiko und Kosten für ein Bauteil

In Abschnitt 3.4.3 wurde dargelegt, dass in der Fachliteratur unterschiedliche Lebensdauerbegriffe existieren, die nicht eindeutig definiert sind und zu Fehlinterpretationen führen können. Im Rahmen dieser Arbeit soll jedoch, wie ebenfalls in Abschnitt 3.4.3 ausgeführt, der Begriff der theoretischen Nutzungsdauer zur Anwendung kommen. Wird für diese theoretische Nutzungsdauer eines Bauteils ein Wert ermittelt oder vorgegeben, so ist für die weiteren Betrachtungen anzunehmen, dass dieser Wert das in Abbildung 36 gezeigte „optimale Ausfallrisiko“ repräsentiert. Anders ausgedrückt wird also suggeriert, dass ein technisches Bauteil unter den Voraussetzungen von einem Hersteller entwickelt wird, dass die theoretische Nutzungsdauer im statistischen Mittel auch erreicht wird. Wäre dies hingegen nicht der Fall, würde das Bauteil eines bestimmten Herstellers gegenüber dem funktionsidentischen Bauteil eines konkurrierenden Anbieters nicht am Markt bestehen können. Unter Beachtung stochastischer Streubreiten ist jedoch ohnehin davon auszugehen, dass ein Bauteil auch vor oder nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer ausfällt und ersetzt werden muss. Eine entsprechende, auf den Verfahren der Statistik beruhende Methodik ist Umfang von Abschnitt 4.4.2.

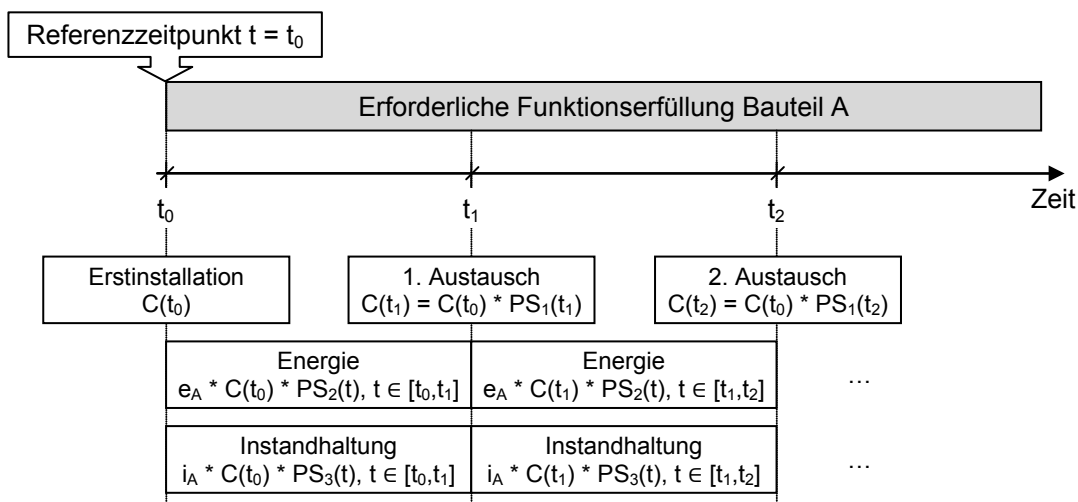
Gruppe 2: Kostenansätze für die Installation und Instandhaltung von Baustoffen und Bauteilen

Bereits zu Beginn dieses Abschnitts wurde die Festlegung getroffen, dass sämtliche Kosten, die mit der Ersterstellung des Rohbaus bzw. mit der Erstinstallation von Bauteilen in Verbindung stehen, den Initialkosten hinzugerechnet werden. Folglich sind auch die Initialkosten in Abhängigkeit vom Fortschritt der Planung mit Unsicherheiten gemäß den in Tabelle 19 bzw. Abbildung 31 angegebenen Schwankungsbreiten behaftet. Umso weiter der Detaillierungsgrad der Planung voranschreitet, desto geringer ist der Kostenschwankungsbereich. Es wird also mit der Bauwerksfertigstellung einerseits Gewissheit bezüglich der Höhe der

Initialkosten erreicht, andererseits wird eine verlässliche Grundlage zur Fortschreibung der Bauteilkosten geschaffen. Nach Erfordernis sind die im Folgenden aufgeführten Kostenanteile für jedes Bauteil bzw. jeden Baustoff getrennt zu ermitteln. Darin müssen die potenziellen Anteile für Material, Lohn, Geräte oder Hilfsstoffe enthalten sein:

- die Ersterstellungskosten, die der Gesamtsumme der Initialkosten zufließen,
- die Kosten, die auf den Austausch eines Bauteils bzw. eines Baustoffs entfallen. Hierbei sind ggf. auch weitere Kosten zu berücksichtigen, die durch den Ausbau des Bauteils sowie dessen Entsorgung entstehen,
- Kosten für Inspektion, Wartung und Instandsetzung. Dieser Kostenanteil stellt einen Prozentsatz der Ersterstellungs- bzw. Austauschkosten dar und kann bei Bedarf mit einem linearen Anstieg versehen werden, der die Zunahme des Instandhaltungsaufwands mit zunehmendem Abbau des Abnutzungsvorrates ausdrückt,
- Kosten für Betriebs- und Verbrauchsstoffe. Hierzu zählen Energiekosten sowie Kosten für Medien wie Wasser, Schmierstoffe oder Reinigungsmittel.

Sämtliche Kostenwerte, die in den Prozess der Lebenszykluskostenanalyse aufgenommen werden, sind zunächst reale Werte. Daraus erhebt sich die Forderung, dass der Preisstand der realen Kosten dem Zeitpunkt entsprechen muss, der gleichzeitig auch den Referenzzeitpunkt der Lebenszykluskostenanalyse darstellt. Reale Werte sind in nominale Werte bzw. Barwerte umzurechnen, wenn sie Zeitpunkten zugeordnet werden, die nicht dem Referenzzeitpunkt entsprechen. Die Umrechnung von realen in nominale Werte wird vollzogen, um Preisanpassungseffekte zu berücksichtigen, die beispielweise aus der Inflationsentwicklung resultieren. Die Abschätzung zukünftiger Preisentwicklungen erfolgt dabei auf der Grundlage von in der Vergangenheit festgestellten Preisindizes. Es wird ersichtlich, dass diese Umrechnung wiederum Unsicherheiten beinhaltet. Die beschriebene Abhängigkeit zwischen realen und nominalen Werten ist in Abbildung 37 schematisch aufgezeigt. In Abschnitt 4.4.5.3 wird ein Verfahren entwickelt, das die Annäherung an die erforderliche Größenordnung der Preisanpassung erlaubt.



wobei:

$C(t_i) =$ Kosten zum Zeitpunkt $t_i, i = 0, 1, 2, \dots$

$PS_1(t_i) =$ Faktor zur Berücksichtigung der Preissteigerung für die Bauteilbeschaffung im Intervall $[t_0, t_i], i = 1, 2, \dots$

$e_A * C(t_i) =$ Energiekosten zum Zeitpunkt $t_i, i = 0, 1, 2, \dots$

$PS_2(t) =$ Faktor zur Berücksichtigung der Preissteigerung für Energie im Intervall $[t_{i-1}, t_i], i = 1, 2, \dots$

$i_A * C(t_i) =$ Instandhaltungskosten zum Zeitpunkt $t_i, i = 0, 1, 2, \dots$

$PS_3(t) =$ Faktor zur Berücksichtigung der Preissteigerung für Instandhaltung im Intervall $[t_{i-1}, t_i], i = 1, 2, \dots$

Abbildung 37: Schematische Darstellung zur Berücksichtigung verschiedener Preisentwicklungen

Neben den zuvor genannten Einflüssen existieren weitere, die eine genaue Prognostizierung der Folgekosten unsicher machen. Bauteile unterliegen einer stetigen technischen Weiterentwicklung, wobei diese einerseits durch den Einsatz innovativer Techniken, andererseits durch die Vorgabe von normativen Vorgaben oder Richtlinien ausgelöst werden können. Dieser Einfluss ist jedoch nicht valide abschätzbar. Darüber hinaus erwachsen Unsicherheiten ggf. daraus, dass Wartungsverträge, die nach der Erstinbetriebnahme über einen definierten Zeitraum vereinbart werden, nicht mehr zu vergleichbaren Konditionen verlängert werden können. Dabei ist jede Preisanpassung, die unterhalb der Preissteigerungsrate angesiedelt ist, nicht mit negativen Konsequenzen verbunden. Eine vergleichbare Problematik trifft für Schwankungen bei Energie- und Stoffpreisen zu. Anhand der deutlichen Preissteigerungen im Energiesektor innerhalb einiger weniger Jahre lassen sich die Unsicherheiten verdeutlichen, die mit einer langfristigen Fortschreibung dieser Kostenart verbunden sind.

Wird ein Straßentunnelvorhaben auf Basis einer vertraglich vereinbarten Öffentlich-Privaten-Partnerschaft (ÖPP) durchgeführt, so stehen den Kosten Erlöse gegenüber. Erlöse können aus Mauteinnahmen oder aus vertraglich fixierten Verfügbarkeitszahlungen hervorgehen. Das Ausbleiben zuvor prognostizierter Verkehrsmengen oder die Reduktion von Verfügbarkeitsentgelten im Falle von Spur- oder Tunnelsperrungen sind Faktoren, die Unsicherheiten auf der Erlösseite hervorrufen. Bereits mit Abschluss einer ÖPP können die mit einer Beeinträchtigung des Verkehrsflusses im Tunnel im Zusammenhang stehenden monetären Konsequenzen nach den folgenden Kriterien festgelegt werden:

- Art der Sperrung: Voll- oder Teilsperrung,
- Länge des von der Sperrung betroffenen Bereichs,
- Tag- oder Nachtsperre,
- Streckenabschnitt mit geringer, mittlerer oder hoher Staugefahr.

Je nach Art der vertraglichen Vereinbarung ist es bei ÖPP-Projekten demnach möglich, dass Kosten, die für Instandhaltungsmaßnahmen aufgewendet werden, im Gegenzug eine Minderung von Erlösen hervorrufen. Derartige Regelungen sollen für den Konzessionsnehmer einen Anreiz schaffen, Instandhaltungen strategisch zu planen und den Erlösausfall so gering wie möglich zu gestalten. Somit ergibt sich ein weiteres Element, welches insbesondere bei der Planung eines ÖPP-Tunnelprojektes zu beachten ist. Bereits während der Planung ist für die zu installierenden Materialien und Komponenten zu überprüfen, welche Konsequenzen aus der Instandhaltung resultieren und ob der Einbauort als optimal bezeichnet werden kann. Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass nicht nur die Kosten-, sondern ebenfalls auch die Erlösseite mit Unsicherheiten verbunden ist.

Gruppe 3: Rahmenbedingungen, die die Anwendung der Investitionsrechnungsverfahren ermöglichen

Die Kapitalwertmethode ermöglicht, wie in Abschnitt 3.5.3 beschrieben, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Zahlungsströme hinsichtlich eines zuvor festgelegten Referenzzeitpunkts vergleichbar zu machen. Für jede Ein- oder Auszahlung muss somit der Barwert zum Referenzzeitpunkt ermittelt werden. Da die Preisentwicklung bereits den im vorherigen Absatz erläuterten Kostenanteilen zugeordnet wurde, decken die Verfahren der Investitionsrechnung die zeitliche Veränderlichkeit des Geldwertes ab. Dem sogenannten „Zeitwert des Geldes“ liegen nach Fabrycky und Blanchard [67] die folgenden Überlegungen zugrunde: Da Geld zu einem feststehenden Zinssatz angelegt werden kann, ist der Wert einer bestimmten Geldmenge heute höher als zu einem Zeitpunkt in der Zukunft. Für einen Euro, der heute angelegt wird, erhält der Anleger durch Verzinsung nach Ablauf des Anlagezeitraums einen Euro zuzüglich einer Zinsgutschrift ausgezahlt. Ein Geldstück, das ein Anleger am Ende des Anlagezeitraums in Händen hält, hat – vorausgesetzt der Zinssatz war größer als Null – über die Dauer der Anlage an Wert verloren. Durch den Zeitwert des Geldes kommt die Ertragskraft des Geldes zum Ausdruck. Das Konzept vom Zeitwert des Geldes beinhaltet die

eigentliche Bedeutung der Investitionsrechnung: Kann mit einer heute zur Verfügung stehenden Geldmenge eine höhere Rendite bei der Investition in ein Projekt als bei einer Geldanlage mit feststehender Zinskondition erreicht werden, so ist der Projektinvestition der Vorzug zu geben. Da es sich bei Tunnelbauwerken mit Ausnahme von Projekten, die auf einer ÖPP basieren, nicht um Renditeobjekte handelt, ist die Investitionsalternative mit dem höchsten Kapitalwert als vorteilhaft zu bewerten. In beiden Fällen kommt der Wahl eines angemessenen Kapitalzinssatzes jedoch eine hohe Bedeutung zu. Die Wahl eines Kapitalzinssatzes erfolgt stets unter unsicheren Rahmenbedingungen. Werden diese Unsicherheiten nicht erkannt oder beachtet, so kann das Ergebnis der Investitionsrechnung eine Vorteilhaftigkeit suggerieren, die durch die wirkliche Entwicklung aufgezehrt wird und einen negativen Projektverlauf auslöst. Die Unsicherheit kann weiter dadurch erklärt werden, dass die Wahl eines geeigneten Zinssatzes an die Bedingungen des Finanzmarktes geknüpft ist und der Zinssatz über die gesamte Dauer der Investitionsrechnung einen festen Wert aufweist. Aus den Ausführungen lässt sich der Schluss ziehen, dass nicht ein einzelner fester Kapitalzinssatz, sondern eine Bandbreite zwischen einem maximal und einem minimal möglichen Kapitalzinssatz abzuschätzen ist. Für die Anwendung der Investitionsrechnungsverfahren auf Tunnelprojekte lässt sich das folgende Resümee ziehen:

- Die Wirtschaftlichkeit eines ÖPP-Tunnelprojektes ist dann gegeben, wenn der resultierende Kapitalwert für eine Projektvariante positiv ist, anderenfalls wird keine Rendite erzielt. Unter mehreren positiven Kapitalwerten ist der maximale Wert auszuwählen. Maßgeblichen Einfluss auf das Berechnungsergebnis übt die Höhe des Kapitalzinssatzes aus.
- Basiert ein Tunnelprojekt auf einer konventionellen Abwicklungsform, so steht nicht die Erzielung eines positiven Kapitalwertes im Vordergrund, sondern bei einem Vergleich mehrerer Varianten ist der kleinste negative Kapitalwert als die vorteilhafteste Variante anzusehen. Der Kapitalzinssatz trägt hier dazu bei, eine Aussage über die Höhe des erforderlichen Kapitals, beispielsweise aus Etats, Steuereinnahmen oder dergleichen zu treffen.

Eine weitere Unsicherheit der Kapitalwertmethode erwächst aus der Tatsache, dass der Abstand zwischen den Zeitpunkten, zu denen Ein- und Auszahlungen verzinst werden, ein Jahr beträgt. Die Berechnung einer unterjährigen Verzinsung ist grundsätzlich möglich, würde jedoch den Rechenaufwand steigern und eine noch detailliertere zeitliche Zuordnung von Ein- und Auszahlungen erfordern. Diese Forderungen können jedoch im Rahmen einer Lebenszykluskostenanalyse für Tunnelbauwerke aufgrund der langen Betrachtungszeiträume nicht ohne weiteres erfüllt werden.

Inhalt des folgenden Abschnitts ist es, die Ermittlung der für eine Lebenszykluskostenanalyse erforderlichen Eingangsparameter unter der Einwirkung von Unsicherheiten aufzuzeigen. Die zuvor in drei Gruppen erfassten und näher beschriebenen Unsicherheiten bilden dabei das theoretische Fundament für die Betrachtungen.

4.4.5 Ableitung parameterspezifischer Lösungsansätze

4.4.5.1 Arten von Prognoseverfahren

Nach Kruschwitz [116] stellt die Prognose der Daten, die in die Investitionsrechnung eingehen, „ein zentrales Problem der Investitionsplanung“ dar. Grundsätzlich können die Prognoseverfahren in qualitative und quantitative Methoden unterteilt werden. Das qualitative Prognoseverfahren stützt sich nach Darstellung von Kruschwitz [116] auf subjektive Einschätzungen, Befragungstechniken und strukturiertes Nachdenken. Derartige Verfahren kommen ohne Mathematik aus und basieren nicht auf in der Vergangenheit beobachteten Werten. Im Gegensatz zu den qualitativen greifen die quantitativen Prognoseverfahren immer auf vorhandene Zeitreihen entsprechender Vergangenheitswerte zurück. Dabei wird die Anwendung statistischer Berechnungsverfahren notwendig. Die statistischen Verfahren lassen sich nach Kruschwitz [116] in uni- und multiva-

riate Methoden unterteilen. Das univariate Vorgehen basiert auf einer Zeitreihe, aus der eine Gesetzmäßigkeit abgeleitet werden kann, die für die Zukunft als gültig angesehen wird. Ein Verfahren wird hingegen als multivariat bezeichnet, wenn die zu prognostizierende Größe von zwei oder mehreren Einflussgrößen abhängt.

Überwiegend handelt es sich bei den in Tabelle 21 aufgeführten, mit Unsicherheiten behafteten Größen um Einflussparameter mit univariatem Charakter. Als univariate Größen sind die theoretische Nutzungsdauer, die Angabe der Kosten zur Erst- und Wiederbeschaffung eines Bauteils, die Entwicklung der Preise aus Preisindizes und die Herleitung eines Kapitalzinssatzes aus aktuellen Zinsverläufen anzusehen. Multivariaten Charakter haben hingegen die Kosten für Wartung, Inspektion sowie für den Verbrauch von Energie und sonstigen Medien. Sie sind multivariat, da ihre jährlichen Kosten als Prozentsatz der Erst- bzw. Wiederbeschaffungskosten eines Bauteils angegeben werden. Durch die Vorgabe eines feststehenden Prozentsatzes wird ein linearer Bezug zwischen den Herstellkosten sowie den Betriebs- und Instandhaltungskosten hergestellt.

Während in Anlehnung an Bertsche und Lechner [8] die quantitativen Methoden der Frage nach der Berechnung der vorausgesagten Zuverlässigkeit nachgehen, ist es die Aufgabe der qualitativen Methode, eine systematische Untersuchung der Auswirkungen von Fehlern und Ausfällen vorzunehmen. Werden Unsicherheiten in die Betrachtungen inkludiert, so geht mit Verweis auf Abschnitt 4.4.2 die quantitative Methode der Beschreibung von Unsicherheiten nach, die qualitative Methode deckt den Bereich der Unschärfe ab. Die folgenden Unterabschnitte 4.4.5.2 bis 4.4.5.4 beinhalten Verfahrensbeschreibungen, aus denen die quantitativen Größen hervorgehen, die für eine Lebenszykluskostenanalyse benötigt werden.

4.4.5.2 Theoretische Bauteilnutzungsdauer

Wird die gesamte Lebenszykluskostendauer eines Tunnelbauwerks durch die hohe Robustheit des Rohbaus geprägt, so hängt die Betriebsbereitschaft des Bauwerks im Wesentlichen davon ab, dass Materialien und Bauteile während dieser Periode unabhängig oder in Kombination ihre Funktionen ausüben. Materialien und Bauteile stehen unter dem Einfluss der Nutzung und zeichnen sich – wie in Abschnitt 3.4.1 beschrieben – durch einen stetigen Abbau des Abnutzungsvorrates aus. Im Folgenden soll ein methodisches Vorgehen aufgezeigt werden, theoretische Nutzungsdauern für Bauteile auf der Grundlage dokumentierter Beobachtungswerte zu ermitteln. Die unter Zuhilfenahme statistischer Verfahren gewonnenen Daten können überdies in einen weitergehenden Bewertungsprozess Eingang finden.

Die Grundlage von Zuverlässigkeitsuntersuchungen ist die Dokumentation derjenigen Zeitpunkte, zu denen eine Betrachtungseinheit funktionsunfähig wird. Da davon ausgegangen wird, dass keine Instandhaltung mehr möglich ist, erfolgt der Austausch der Betrachtungseinheit. Die Gesamtheit der Beobachtungswerte für eine spezifische Betrachtungseinheit bildet den Ausgangspunkt statistischer Untersuchungen. Das Ausfallverhalten für ein System lässt sich nach Bertsche und Lechner [8] mithilfe von vier charakteristischen Funktionen beschreiben. Im Einzelnen sind dies die Dichtefunktion $f(t)$, die Verteilungsfunktion $F(t)$, die Zuverlässigkeitsfunktion $R(t)$ sowie die Ausfallrate $\lambda(t)$. Jede dieser Funktionen ermöglicht eine bestimmte Aussage zum Ausfallverhalten eines Systems bzw. einer Betrachtungseinheit:

- Die Dichtefunktion

$$f(t) = F'(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad t \geq 0 \quad (\text{Formel 4.1})$$

beschreibt für beliebig kleine Zeiträume $\Delta t \rightarrow 0$ durch das Produkt $f(t) \times \Delta t$ die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls im Zeitintervall $[t, t+\Delta t]$.

- Die Verteilungsfunktion bzw. Ausfallwahrscheinlichkeit

$$F(t) = \int f(t) dt, t \geq 0 \quad (\text{Formel 4.2})$$

gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Funktion einer Betrachtungseinheit im Zeitintervall $[0,t]$ irreparabel ausfällt.

- Die Zuverlässigkeitsfunktion

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int f(t) dt, t \geq 0 \quad (\text{Formel 4.3})$$

drückt die Wahrscheinlichkeit aus, dass im Intervall $[0,t]$ kein Ausfall erfolgt.

- Die Ausfallrate

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1-F(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (\text{Formel 4.4})$$

stellt zu einem Zeitpunkt t ein Maß für das Risiko dar, dass eine Betrachtungseinheit unter der Voraussetzung, dass sie bis zum Zeitpunkt t ihre Funktionsfähigkeit beibehalten hat, ausfällt.

Beispielhafte Verläufe für die Dichtefunktion und die Ausfallrate, sowie die grafische Interpretation der Verteilungs- und Zuverlässigkeitsfunktion für den diskreten Ausfallzeitpunkt t_x sind in Abbildung 38 aufgeführt.

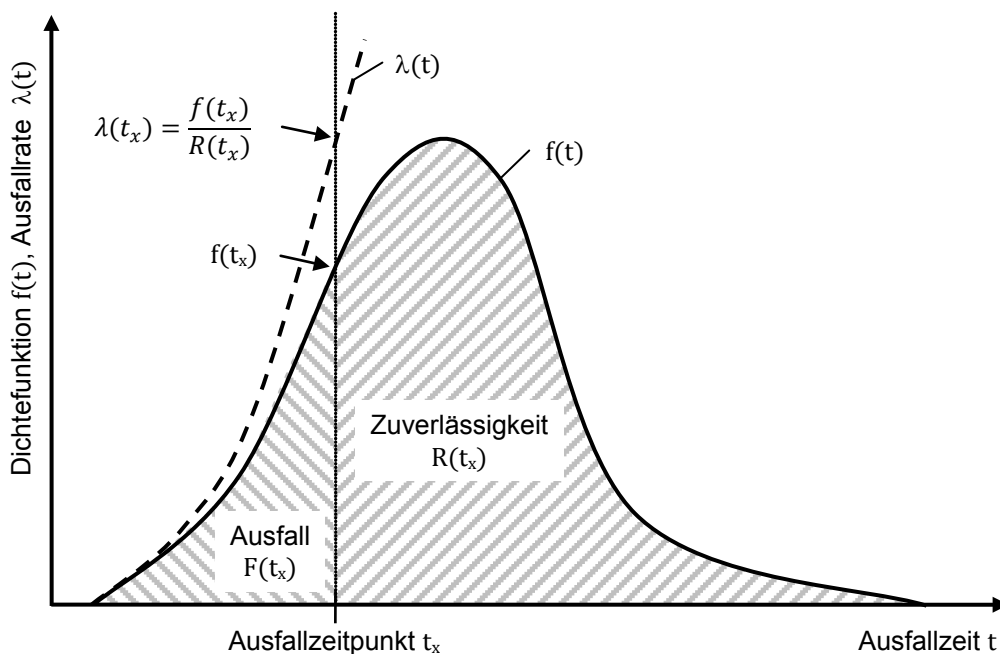


Abbildung 38: Zusammenhang statistischer Funktionen zur Beschreibung des Ausfallverhaltens, nach [8]

Krug [115] stellt den in Abbildung 39 gezeigten Zusammenhang zwischen der Abnahme des Abnutzungsvorrates und der Beschreibung der Vorgänge durch eine Verteilungsfunktion $F(t)$ bzw. eine Dichtefunktion $f(t)$ dar. In der Abbildung wird zudem danach differenziert, ob es sich um die in Abschnitt 3.4.3 erläuterten Früh- und Zufallsausfälle oder um Verschleiß- und Ermüdungsausfälle handelt.

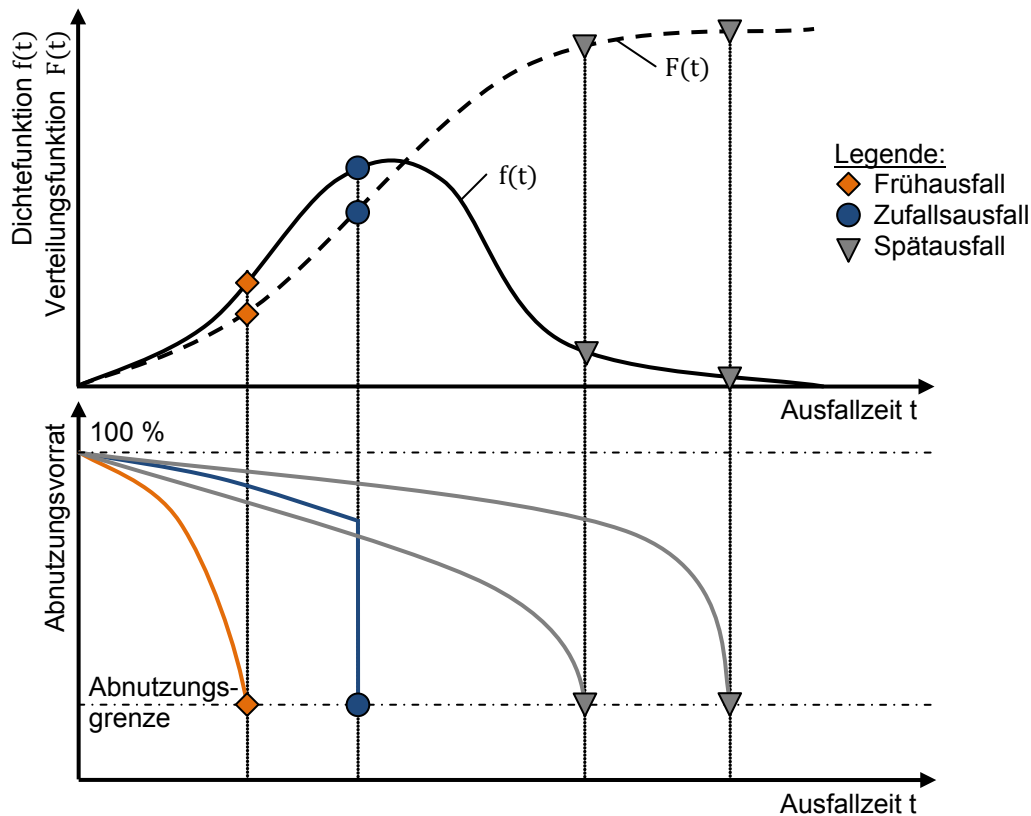


Abbildung 39: Darstellung der Zusammenhänge von Abnutzungsverhalten und Ausfallwahrscheinlichkeit, nach [115]

Werden die Ausfallcharakteristiken einer Betrachtungseinheit auf Grundlage eines großen Stichprobenumfangs untersucht, so lassen sich anhand der Darstellung der Ausfallrate $\lambda(t)$ über die Zeit grundsätzlich drei typische Phasen identifizieren: Die erste Phase umfasst die Frühausfälle. Diese treten in der Regel ohne vorherige Ankündigung auf. In Einklang mit Bertsche und Lechner [8] lässt sich die Ursache für einen Frühausfall zumeist auf einen Montage-, Fertigungs-, Werkstoff- oder Konstruktionsfehler zurückführen. Umso weiter die erste Phase zeitlich voranschreitet, umso mehr nimmt die Wahrscheinlichkeit ab, dass eine Betrachtungseinheit einen Frühausfall erleidet. Die zweite Phase zeichnet sich hingegen durch Zufallsausfälle aus. Die Ausfallrate ist in dieser Phase annähernd konstant. Auslöser von Zufallsausfällen sind beispielweise Bedienungs- und Wartungsfehler. Die letzte und dritte Phase beginnt, sobald die Ausfallrate wieder zunimmt; dieses Ausfallverhalten ist auf Verschleiß- und Ermüdungsmechanismen zurückzuführen. Die Kombination der drei Phasen ergibt die in Abbildung 40 dargestellte Kurve für die Ausfallrate $\lambda(t)$. In der Fachliteratur, zum Beispiel bei Bertsche und Lechner [8], Tilgner [159] oder Wilde [170] wird diese Kurve aufgrund ihrer markanten Form als „Badewannenkurve“ bezeichnet. Für eine Vielzahl technischer Bauteile wurde der charakteristische Verlauf der Badewannenkurve bestätigt; für unterschiedliche Betrachtungseinheiten variiert stets die Größenordnung der auf der Abszisse dargestellten Lebensdauer.

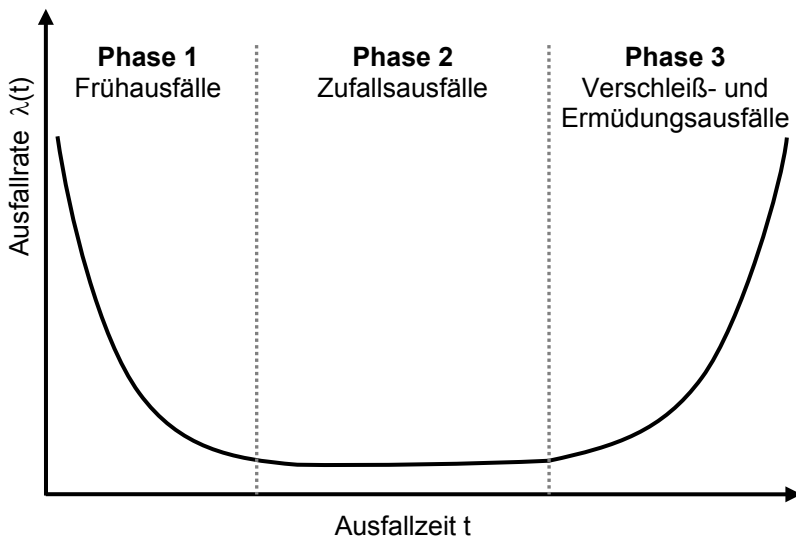


Abbildung 40: Charakteristik der Badewannenkurve, nach [8]

Wie bereits in Abschnitt 3.4.3 beschrieben, werden Frühausfälle im Rahmen der Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln nicht weiter betrachtet. Durch diese Forderung wird aus Sicht des Bauwerksbetreibers bei Frühausfällen Kostenneutralität unterstellt. Bei Zufallsausfällen, die der zweiten Phase der in Abbildung 40 dargestellten Badewannenkurve zugeordnet werden, ist davon auszugehen, dass sie nicht zu einem irreparablen Schaden und einem Austausch des gesamten Bauteils führen. Demzufolge werden durch Zufallsausfälle ausgelöste Reparaturen durch Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen abgedeckt. Wurde zwischen dem Bauwerksbetreiber und dem Hersteller der betriebstechnischen Anlagen ein Wartungsvertrag geschlossen, so ist davon auszugehen, dass Instandsetzungen – sofern sie einen vorher bestimmten Umfang nicht überschreiten – durch das vertraglich vereinbarte Leistungssoll abgedeckt sind. Kommt es jedoch zu einem Ausfall einer Komponente durch Einwirkung eines Dritten – beispielsweise durch einen Unfall, eine Naturkatastrophe oder durch einen terroristischen Akt – so wird die finanzielle Regulierung des Schadens in den meisten Fällen von einer Versicherung erbracht. Entsprechende Versicherungsprämien sind jedoch auf der Kostenseite in der Lebenszykluskostenanalyse zu berücksichtigen. Schließlich bleibt der Fall zu betrachten, dass ein Bauteil oder eine Komponente infolge eines Verschleiß- oder Ermüdungsausfalls seine Funktionsfähigkeit verliert. Verschleiß und Ermüdung stellen einen irreparablen Zustand dar und machen einen Austausch erforderlich. Wäre aus technischer Sicht zwar eine Instandsetzung des Bauteils möglich, so ist unter Einbeziehung des Bauteilalters eine Reparatur aus wirtschaftlicher Sicht in den meisten Fällen nicht sinnvoll. Der dieser Überlegung zugrunde liegende Zusammenhang zwischen technischer und wirtschaftlicher Lebensdauer einer Betrachtungseinheit wurde bereits in Abschnitt 3.4.2 erläutert. Es wird das Resümee gezogen, dass Verschleiß- und Ermüdungsausfälle einen starken Einfluss auf die Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerks ausüben und unter Implementierung valider theoretischer Nutzungsdauern berücksichtigt werden müssen.

Die statistische Auswertung beobachteter Ausfallzeitpunkte

Zur Abschätzung der Verschleiß- und Ermüdungsausfälle kommt ein statistisches Verfahren zur Anwendung, das das Ausfallverhalten eines Bauteils realitätsnah abbildet. Die zuvor genannte Dichtefunktion $f(t)$ (vgl. Formel 4.1) sowie alle weiteren aus ihr abzuleitenden Funktionen müssen entsprechend angepasst und ausgewertet werden. Eine Anpassung wird dadurch möglich, dass die Funktionen mit einer geeigneten Verteilungscharakteristik überlagert werden. Verteilungen, die für die Lebensdaueranalyse von Bauteilen genutzt werden, sind die Normal- bzw. Gauß-, die Exponential- und die Weibullverteilung. Die Lebensdauerer-

teilung, die im Maschinenbau und in der Baubetriebstechnik nach Bertsche und Lechner [8], Fleischer und Wawerla [69], Boussabaine und Kirkham [10], Krug [115] und Plate [138] als äußerst geeignet angesehen wird, ist die Weibullverteilung. Aus diesem Grund soll im Weiteren ausschließlich die Weibullverteilung für eine nähere Betrachtung herangezogen werden. Bertsche und Lechner [8] betonen, dass „mit der Weibullverteilung unterschiedliches Ausfallverhalten sehr gut beschrieben werden kann“. Insbesondere der Formparameter b der Weibullverteilung hat Einfluss auf den grafischen Verlauf der Dichtefunktion. Für einen Formparameter $b > 1$ beginnt die Dichtefunktion $f(t)$ stets bei $f(t)=0$, erreicht dann mit zunehmender Lebensdauer ein Maximum und fällt schließlich flach ab. Mit zunehmend größeren b -Werten verschiebt sich das Maximum der Dichtefunktion immer weiter nach rechts und bildet somit immer deutlicher Verschleiß- und Ermüdungsausfälle ab. Wird unter Ansatz eines großen b -Wertes, etwa $b=5$, die Ausfallrate der Weibullverteilung dargestellt, so bildet der Kurvenverlauf die dritte Phase der „Badewannenkurve“ ab.

Die Weibullverteilung kann nach [8] als zwei- oder dreiparametrische Verteilung zur Anwendung kommen. Die zweiparametrische Weibullverteilung besitzt als Parameter die charakteristische Lebensdauer T und den zuvor schon erwähnten Formbeiwert b . Die charakteristische Lebensdauer T kann als eine Art Mittelwert angesehen werden; dieser legt fest, an welcher Stelle sich die Mitte der Verteilung befindet. Aus einer Erhöhung der charakteristischen Lebensdauer T resultiert, dass das Ausfallverhalten zu insgesamt längeren Ausfallzeiten führt. Der Formparameter b ist ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten und übt Einfluss auf die Gestalt der Verteilungsfunktion aus. Im Folgenden sind die Funktionen der zweiparametrischen Weibullverteilung aufgeführt:

$$\text{Dichtefunktion:} \quad f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (\text{Formel 4.5})$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit:} \quad F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (\text{Formel 4.6})$$

$$\text{Zuverlässigkeitsfunktion:} \quad R(t) = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \quad (\text{Formel 4.7})$$

$$\text{Ausfallrate:} \quad \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T} \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^{b-1} \quad (\text{Formel 4.8})$$

wobei:

t	Ausfallzeitpunkt
b	Formparameter der Weibullverteilung
T	charakteristische Lebensdauer
e	Eulersche Zahl ($e = 2,71828\dots$)

Exemplarisch sind in Abbildung 41 die vier Darstellungsformen der zweiparametrischen Weibullverteilung für die charakteristische Lebensdauer $T=1,0$ in Kombination mit drei verschiedenen Werten für den Formparameter b dargestellt.

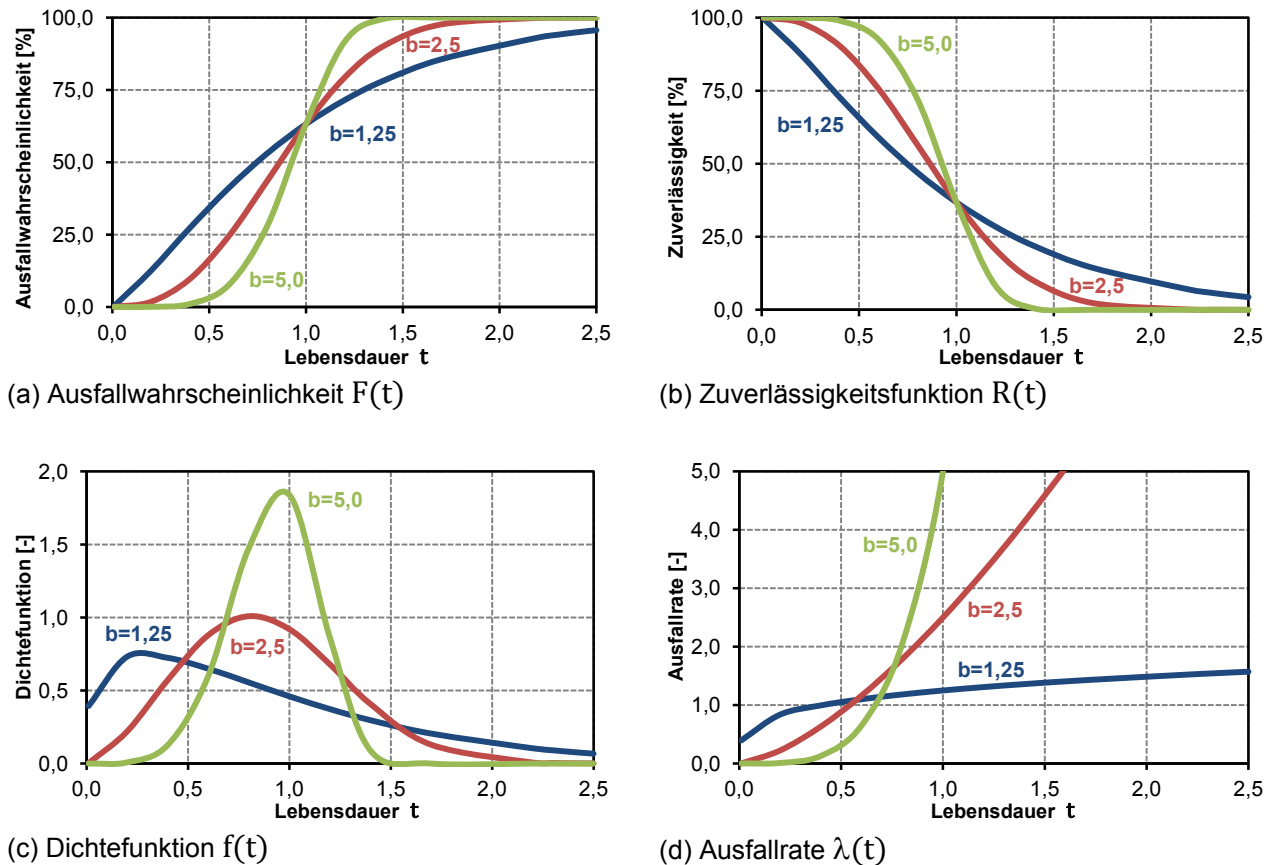


Abbildung 41: Darstellungsformen einer zweiparametrischen Weibullverteilung

Die dreiparametrische Weibullverteilung besitzt neben den Größen T und b als zusätzlichen Parameter die ausfallfreie Zeit t_0 . Mithilfe dieses dritten Parameters wird eine gezielte Vorgabe ermöglicht, Ausfälle erst ab einem bestimmten Zeitpunkt t_0 zu berücksichtigen. Die dreiparametrische Weibullverteilung lässt sich durch eine Zeittransformation aus der zweiparametrischen Weibullverteilung herleiten: Dazu werden jeweils auf der rechten Seite der Gleichungen der zweiparametrischen Weibullfunktionen die Ausfallzeit t durch den Term $t-t_0$ und die charakteristische Lebensdauer T durch den Term $T-t_0$ ersetzt. Die dreiparametrische Weibullverteilung wird durch die folgenden Funktionen ausgedrückt:

$$\text{Dichtefunktion: } f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (\text{Formel 4.9})$$

$$\text{Ausfallwahrscheinlichkeit: } F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (\text{Formel 4.10})$$

$$\text{Zuverlässigkeitsfunktion: } R(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (\text{Formel 4.11})$$

$$\text{Ausfallrate: } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \quad (\text{Formel 4.12})$$

wobei:

t_0 ausfallfreie Zeit

Unabhängig davon, ob die zwei- oder die dreiparametrische Weibullverteilung auf eine Stichprobe dokumentierter Ausfalldaten angewendet wird, lassen sich im Zuge einer Lebensdaueranalyse einige markante Werte

ermitteln. Dies sind die im Weiteren näher erläuterte charakteristische Lebensdauer T , der sogenannte „Mean Time to Failure“-Wert (MTTF) sowie die B_x -Lebensdauer.

Die charakteristische Lebensdauer T ist genau dem Zeitpunkt zugeordnet, zu dem 36,8 % der Bauteile eines Typs noch funktionstüchtig bzw. 63,2 % bereits ausgefallen sind. Diese Werte ergeben sich unmittelbar aus der mathematischen Konstruktion der Weibullfunktion. Wird in die Zuverlässigkeitsfunktion (vgl. Formeln 4.7 und 4.11) für die Zeit t die charakteristische Lebensdauer T eingesetzt, so ergibt sich unabhängig vom Formparameter b der Ausdruck $R(t=T) = 1/e$ zu einem konstanten Wert von 0,368. Entsprechend gilt für die Ausfallwahrscheinlichkeit nach den Formeln 4.6 und 4.10, dass aus $F(t=T) = 1 - 1/e = 1 - R(t=T)$ ein Wert von 0,632 resultiert. Die Ausfallwahrscheinlichkeit und die Zuverlässigkeitsfunktion der Weibullverteilung nehmen somit für den Zeitpunkt T den Charakter von Stützstellen an. Wie aus der Abbildung 41 (a) bzw. (b) ersichtlich wird, schneiden sich sämtliche Kurven in diesem Punkt.

Der Mittelwert der ausfallfreien Zeit einer irreparablen Betrachtungseinheit wird zumeist als Mean Time to Failure (MTTF) bezeichnet. Nach DIN EN ISO 13849-1 „Sicherheit von Maschinen“ [62] ist die Größe MTTF der „Erwartungswert der mittleren Zeit bis zum Ausfall“ und ist wie folgt definiert:

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (\text{Formel 4.13})$$

Die Größenordnung MTTF kann nach Bertsche und Lechner [8] näherungsweise als der arithmetische Mittelwert angesehen werden:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \approx \text{MTTF} \quad (\text{Formel 4.14})$$

Die B_x -Lebensdauer ist gemäß [8] dem Zeitpunkt t_x zugeordnet, zu dem bereits ein Anteil von x % identischer Betrachtungseinheiten nach der dreiparametrischen Weibullverteilung ausgefallen ist. Eine B_{10} -Lebensdauer bestimmt den Zeitpunkt, zu dem bereits 10 % der Teile funktionsunfähig geworden sind.

$$T = \frac{B_x - f_{tB} \cdot B_x}{b \sqrt{-\ln(1-x)}} + f_{tB} \cdot B_x \quad (\text{Formel 4.15})$$

wobei:

$$B_{10} = \frac{B_x}{(1-f_{tB}) \cdot b \sqrt{\frac{\ln(1-x)}{\ln(0,9)}} + f_{tB}} \quad (\text{Formel 4.16})$$

$$f_{tB} = \frac{t_0}{B_{10}} \quad (\text{Formel 4.17})$$

Insbesondere für $x = 63,2$ gilt: $B_{63,2} = F(T) = 0,632$

Im Folgenden soll ein Vorgehen aufgezeigt werden, wie anhand von Beobachtungswerten unter Zuhilfenahme der Weibullverteilung die notwendigen statistischen Kennzahlen ermittelt werden. Liegen Beobachtungswerte zu Ausfallzeitpunkten t_i einer spezifischen Komponente vor, so ist im ersten Schritt eine Sortierung der Daten vorzunehmen.

1. Schritt: Sortierung der Daten, wobei $t_{i+1} \geq t_i$, mit $i = \{1, 2, \dots, n\}$

Aus dem Stichprobenumfang erfolgt im anschließenden zweiten Schritt die Ermittlung näherungsweise Wahrscheinlichkeiten $\hat{F}(t_i)$ für jeden dokumentierten Ausfallzeitpunkt t_i .

2. Schritt: Bestimmung näherungsweise Wahrscheinlichkeiten:

$$\hat{F}(t_i) = \frac{i-0,3}{n+0,4} \quad (\text{Formel 4.18})$$

Die Parameter T und b der zweiparametrischen Weibullverteilung werden im dritten Schritt berechnet. Üblicherweise erfolgt die Ermittlung auf grafischem Wege unter Zuhilfenahme eines Weibullwahrscheinlichkeits-

papiers. Nach Bertsche und Lechner [8] existiert zur Ermittlung der charakteristischen Lebensdauer T jedoch eine geschlossene Lösung für den Fall, dass zwei Stützstellen der Weibull-Wahrscheinlichkeitsverteilung bekannt sind:

$$T = \exp\left(\frac{\ln(-\ln(1-F(t_1))) \cdot \ln(t_2) - \ln(-\ln(1-F(t_2))) \cdot \ln(t_1)}{\ln(-\ln(1-F(t_1))) - \ln(-\ln(1-F(t_2)))}\right) \quad (\text{Formel 4.19})$$

Um die geschlossene Lösung anwenden zu können, ist durch den Verfasser ein rechnerisches Näherungsverfahren zur Bestimmung zweier Stützstellen entwickelt und durch mehrfache Anwendung validiert worden. Dazu werden die den Ausfallzeiten t_i zugrunde liegenden Wahrscheinlichkeiten $\hat{F}(t_i)$ aus Schritt 2 zunächst in zwei Gruppen aufgeteilt. Die erste Gruppe beinhaltet die Daten, die einen Wahrscheinlichkeitswert bis einschließlich 50 % aufweisen, die Daten der zweiten Gruppe erfüllen die Forderung $\hat{F}(t_i) > 50\%$. Anschließend werden je Gruppe die arithmetischen Mittel gebildet. Dem Mittelwert \bar{t}_u sind die Daten t_i im Intervall $i = [1, \dots, n^*]$, welche $\hat{F}(t_i) \leq 50\%$ erfüllen, zugeordnet. Für Wahrscheinlichkeiten $\hat{F}(t_i) > 50\%$ wird der Mittelwert \bar{t}_o im Intervall $i = [n^*+1, \dots, n]$ errechnet. Auf Grundlage der in Schritt 2 ermittelten Wahrscheinlichkeiten $\hat{F}(t_i)$ werden mit Hilfe einer linearen Interpolation schließlich die benötigten Stützstellen $F(\bar{t}_u)$ bzw. $F(\bar{t}_o)$ ermittelt. Im Einzelnen sind die im Folgenden aufgeführten Berechnungen durchzuführen:

$$\text{Für } \hat{F}(t_i) \leq 50\%: \quad \bar{t}_u = \frac{1}{n^*} \sum_{i=1}^{n^*} t_i \quad (\text{Formel 4.20})$$

wobei $i = [1, \dots, n^*]$

$$F(\bar{t}_u) = \left[\frac{\hat{F}(t_{u+1}) - \hat{F}(t_{u-1})}{t_{u+1} - t_{u-1}} * (\bar{t}_u - t_{u-1}) \right] + \hat{F}(t_{u-1}) \quad (\text{Formel 4.21})$$

wobei $t_{u-1} \leq \bar{t}_u \leq t_{u+1}$

$$\text{Für } \hat{F}(t_i) > 50\%: \quad \bar{t}_o = \frac{1}{(n-n^*)} \sum_{i=n^*+1}^n t_i \quad (\text{Formel 4.22})$$

wobei $i = [n^*+1, \dots, n]$

$$F(\bar{t}_o) = \left[\frac{\hat{F}(t_{o+1}) - \hat{F}(t_{o-1})}{t_{o+1} - t_{o-1}} * (\bar{t}_o - t_{o-1}) \right] + \hat{F}(t_{o-1}) \quad (\text{Formel 4.23})$$

wobei $t_{o-1} \leq \bar{t}_o \leq t_{o+1}$

3. Schritt: Die für \bar{t}_u und \bar{t}_o bzw. für $F(\bar{t}_u)$ und $F(\bar{t}_o)$ errechneten Werte werden in die Formel 4.19 zur Berechnung der charakteristischen Lebensdauer T eingesetzt:

$$T = \exp\left(\frac{\ln(-\ln(1-F(\bar{t}_u))) \cdot \ln(\bar{t}_o) - \ln(-\ln(1-F(\bar{t}_o))) \cdot \ln(\bar{t}_u)}{\ln(-\ln(1-F(\bar{t}_u))) - \ln(-\ln(1-F(\bar{t}_o)))}\right) \quad (\text{Formel 4.24})$$

In einem iterativen Prozess wird im vierten Schritt der Parameter b ermittelt. Für Verschleiß- und Ermüdungsausfälle nimmt der Formbeiwert b nach [8] Werte größer als 1 an. Ein Wert für den Parameter b , der größer als 1 ist, deutet darauf hin, dass die Ausfallrate mit zunehmender Lebensdauer steigt. Die Iteration zur Ermittlung der Größe b betrachtet daher Werte im Intervall zwischen 1 und 6. Der Wert b , für welchen die Differenz zwischen der berechneten Ausfallwahrscheinlichkeitsfunktion nach Weibull und der näherungsweise Ausfallwahrscheinlichkeit aus dem Stichprobenumfang minimal wird, ist iterativ zu bestimmen.

4. Schritt: Gesucht ist der Wert b , für den die Differenz aus $F(t_i)$ und $\hat{F}(t_i)$ gegen Null strebt:

$$\text{Diff} = F(t_i) - \hat{F}(t_i) = \left[1 - e^{-\left(\frac{t_i}{T}\right)^b} \right] - \left[\frac{i-0,3}{n+0,4} \right] \rightarrow 0 \quad (\text{Formel 4.25})$$

wobei $1 \leq b \leq 6$

In Abschnitt 6.3.1 wird das beschriebene Verfahren anhand eines Beispiels verdeutlicht.

Strategien zur Implementierung theoretischer Nutzungsdauern in die Lebenszykluskostenanalyse

Bei der Ermittlung von theoretischen Nutzungsdauern kann, wie in Abbildung 42 dargestellt, zwischen zwei Ausgangssituationen unterschieden werden. Die als Fall 1 bezeichnete Situation basiert auf der Angabe theoretischer Nutzungsdauern, die aus der einschlägigen Fachliteratur oder aus Regelwerken abgeleitet werden können. Zudem ist es möglich, dass Hersteller Angaben zu durchschnittlichen Nutzungsdauern zur Verfügung stellen. Greift ein Bauwerksbetreiber auf eine theoretische Nutzungsdauer der zuvor genannten Quellen zurück, so muss er sich Gewissheit darüber verschaffen, welche Konsequenzen mit der Wahl eines spezifischen Wertes verbunden sind. Handelt es sich beispielsweise um einen aus Versuchen oder Beobachtungen hergeleiteten Mittelwert oder ist der angegebene Wert das Ergebnis einer Abschätzung, so sind angemessene Risiko- oder -abschläge zu berücksichtigen. Die in Abbildung 42 als Fall 2 benannte Situation basiert hingegen auf der Annahme, dass konkrete Beobachtungswerte zu Ausfallzeitpunkten vorliegen. Derartige Beobachtungswerte stellen einen Stichprobenumfang dar; jeder einzelne Stichprobenwert beschreibt ein gemessenes Zeitintervall, das sich von der Inbetriebnahme bis zum irreparablen Ausfall einer Komponente erstreckt. Je größer der Umfang der Stichprobe zur Erfassung der Lebensdauer für ein Bauteil bzw. für eine Komponente ist, desto höher ist der Validierungsgrad der durch die Statistik vermittelten Aussage. Dem zweiten Fall liegt zudem die Annahme zugrunde, dass das beobachtete Ausfallverhalten hinreichend genau durch eine Weibullverteilung abgebildet werden kann. Für technische Komponenten und bautechnische Produkte sind diese Voraussetzungen in der Regel erfüllt.

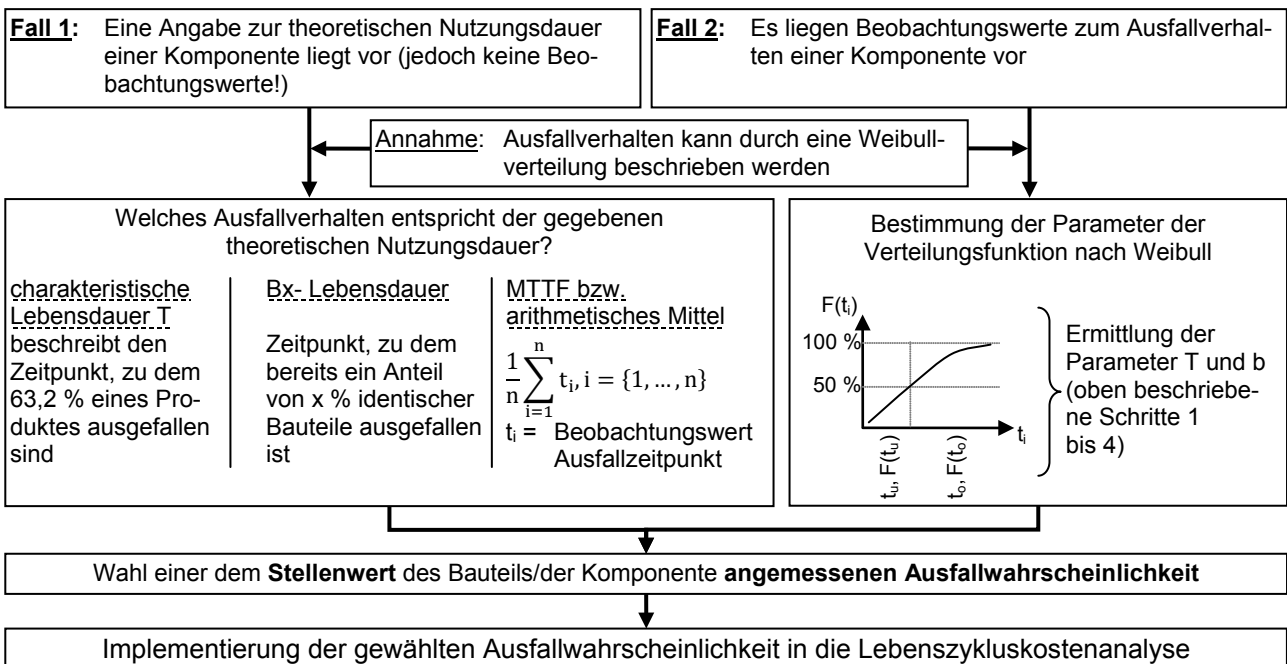


Abbildung 42: Systematik zur Ermittlung der Ausfallwahrscheinlichkeit

Wie im unteren Teil der Abbildung 42 optisch hervorgehoben, ist auf Grundlage des Stellenwertes, den ein Bauteil besitzt, eine angemessene Ausfallwahrscheinlichkeit auszuwählen. Eine angemessene Ausfallwahrscheinlichkeit für ein Bauteil spiegelt zum einen die Art des funktionalen Einsatzbereiches wider, zum anderen drückt sich dadurch die sicherheitstechnische Relevanz aus. Aus der sicherheitstechnischen Relevanz eines Bauteils lässt sich folgern, ob eine Komponente infolge eines irreparablen Ausfalls unverzüglich oder ggf. erst mit einigem Zeitabstand durch eine neue Komponente zu ersetzen ist. Hierüber entscheidet auch die Tatsache, ob Redundanzen vorliegen und somit der Funktionsausfall innerhalb einer Übergangsfrist

durch ein anderes Bauteil mit übernommen werden kann. Ein Bauteil, das der höchsten sicherheitstechnischen Kategorie angehört, kann jedoch bei Funktionsausfall auch die Notwendigkeit erfordern, den Tunnelbetrieb einzuschränken oder vorübergehend zu unterbrechen. Da das zuletzt beschriebene Szenario zu vermeiden ist, müssen Ersatzkomponenten schnellstmöglich verfügbar sein. Handelt es sich um eine Komponente von hoher sicherheitstechnischer Bedeutung, so ist im Weiteren danach zu differenzieren, ob es sich bei der betrachteten Komponente um ein in hoher Stückzahl vorhandenes Verschleißbauteil handelt oder ob die Komponente nur in sehr geringer Stückzahl zur Anwendung kommt. Verschleißbauteile sind beispielsweise Leuchtmittel, Hinweistafeln, Handfeuerlöcher oder Hammerkopfschrauben zur Fixierung von Einbauteilen an Ankerschienen. Bei diesen und weiteren vergleichbar häufig zum Einsatz kommenden Komponenten ist davon auszugehen, dass sie als Ersatzteil dauerhaft vorgehalten werden. Bauteile, die in geringer Stückzahl im Tunnel verbaut sind und ggf. speziell angefertigt werden müssen, sind Tunnelventilatoren, Rauchabzugsklappen, Sichtweitenmessgeräte oder Schrankenanlagen zur Sperrung der Tunnelzufahrt. Die Wiederbeschaffung dieser Bauteile geht einerseits mit hohen Folgekosten einher und ist andererseits gewöhnlich mit Lieferfristen in der Größenordnung mehrerer Wochen verbunden.

Der Umgang mit der zuvor erläuterten sicherheitstechnischen Relevanz von Bauteilen kann, wie in Abbildung 43 anhand der Fälle 1 und 2 verdeutlicht, auf unterschiedlichen Herangehensweisen beruhen. In Abhängigkeit der gewählten Strategie kann die Wahl der zweckmäßigen Ausfallwahrscheinlichkeit variieren. Dabei besteht eine direkte Abhängigkeit zwischen der gewählten Ausfallwahrscheinlichkeit und den Auswirkungen auf die Folgekosten. Insbesondere für Verschleißteile, deren Instandsetzung aus wirtschaftlicher Sicht nicht lohnenswert ist bzw. für Bauteile, die in einer hohen Anzahl im Tunnel verbaut sind, ergeben sich zwei mögliche Ansätze:

- Es werden in ausreichender Stückzahl Austauschelemente vorgehalten und zeitnah durch das Betriebspersonal installiert,
- Der Austausch von ausgefallenen Bauteilen oder Komponenten wird durch einen Wartungsvertrag abgedeckt; dieser Vertrag ist zwischen dem Tunnelbetreiber und einem Spezialunternehmer abzuschließen. Der Vertrag enthält die im Wartungsfall durchzuführenden Arbeiten sowie Fristen, die zur Erbringung der Wartungsleistung einzuhalten sind.

Führt der Tunnelbetreiber die Beschaffung und den Austausch von Bauteilen mit eigenem Personal aus, so lernt er mit fortschreitender Zeit, den erforderlichen Wartungsbedarf einzuschätzen. Wird hingegen ein Wartungsvertrag geschlossen, so übergibt der Tunnelbetreiber das mit der Ausfallwahrscheinlichkeit verknüpfte Risiko sowie die Pflicht, den fristgerechten Bauteilaustausch vorzunehmen, in den Verantwortungsbereich eines Spezialisten. Dieser erledigt alle Austauschvorgänge, wird sich das zuvor beschriebene Risiko aber durch fest vereinbarte, regelmäßige Pauschalzahlungen vergüten lassen. Die laufenden Kosten, die aus der Vertragserfüllung resultieren, sind als Folgekosten im Lebenszykluskostenmodell zu erfassen.

Bei Komponenten, die nur in sehr geringer Stückzahl in einem Tunnelbauwerk zum Einsatz kommen, ist bezüglich der Wahl einer angemessenen Ausfallwahrscheinlichkeit einer der folgenden drei Ansätze zu wählen:

- Ein Spezialunternehmer ist im Rahmen einer vertraglichen Vereinbarung verpflichtet, Bauteile unter Einhaltung zuvor definierter Reaktionsfristen auszutauschen,
- Durch den Betreiber wird ein entsprechendes Reservebauteil in der Nähe des Tunnelbauwerks vorgehalten, welches zur Überbrückung eines Ausfalls im Tunnel installiert wird. Bei dem Reservebauteil handelt es sich um ein instand gesetztes Bauteil, welches bis zur Lieferung eines neuwertigen Ersatzes genutzt wird. Diese Strategie erfordert die doppelte Zahl an Austauschvorgängen und ist nur dann geeignet, wenn die Kompatibilität zwischen dem Reservebauteil mit der Leitrechnereinheit gegeben ist,
- Für ein in geringer Stückzahl im Tunnel verbautes Bauteil wird eine geringe Ausfallwahrscheinlichkeit angenommen. Aufgrund eines sehr frühzeitigen Wiederbeschaffungszeitpunktes ist davon auszugehen,

dass nach einem irreparablen Ausfall ein rascher Austausch vollzogen werden kann. Mit dieser Strategie ist der Nachteil verbunden, dass Ersatzkomponenten vorgehalten werden, ohne dass sie ihren funktionsbestimmenden Betrieb erfüllen. Dabei ist zu bedenken, dass auch die Lagerhaltung von Bauteilen mit einem geringen, aber kontinuierlichen Abbau des Abnutzungsvorrats einhergeht.

Für die drei aufgeführten Strategien zum Austausch irreparabler Tunnelausstattung ist in Abbildung 43 eine qualitative Allokation der Risiken sowie deren Auswirkungen auf die Kosten aufgeführt. Die unterschiedlichen Strategien sind im Zuge einer Lebenszykluskostenanalyse zu untersuchen und einer abschließenden Bewertung zuzuführen.

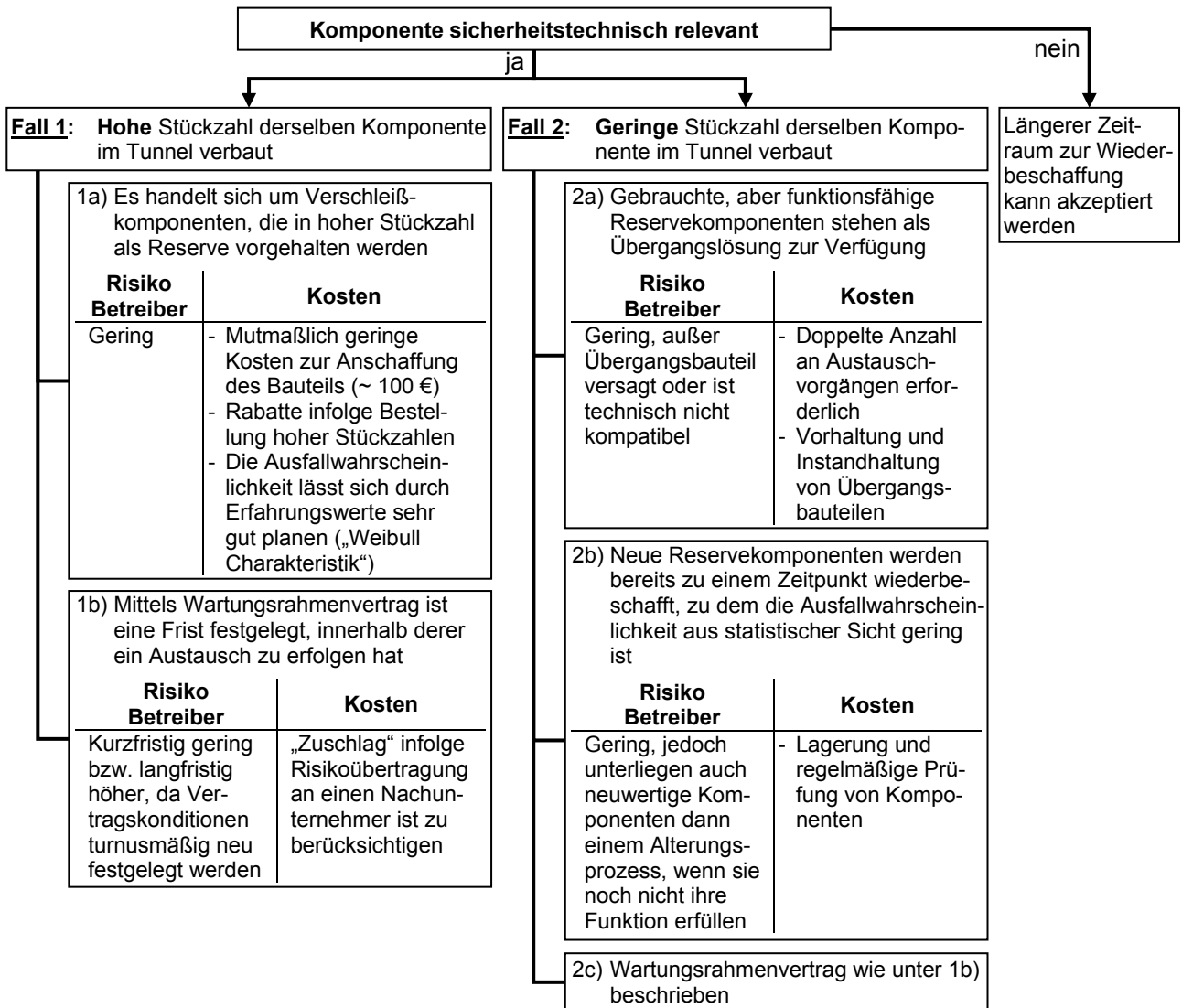


Abbildung 43: Strategien für den Austausch irreparabler Tunnelausstattung und das Risiko für den Betreiber

In Tabelle 22 sind Empfehlung aufgeführt, die bei der Abschätzung theoretischer Nutzungsdauern von Bauteilen und Komponenten eines Straßentunnels einzubeziehen sind. Dafür werden die in Abbildung 43 aufgeführten Strategien aufgegriffen und in die Entscheidungsfindung inkludiert. Die ausgewählten Strategien sind in die Lebenszykluskostenanalyse einzubinden und die daraus zu resultierenden Konsequenzen zu evaluieren.

Fall gemäß Abbildung 43			
		Anzahl der installierten Bauteile	
		Instandhaltungsstrategien: Eigenleistung (EL), Rahmenvertrag (RV), Übergangslösung (ÜL) oder Frühzeitige Wiederbeschaffung (FW)	
		Empfehlungen	
1a)	hoch	EL	Etwa 5 – 10 % der insgesamt verbauten Komponente sind als Ersatz vorzuhalten. Ggf. sollten hohe Stückzahlen unter Nutzung von Mengenrabatten beschafft werden.
1b)	hoch	RV	Der Kalkulation ist eine B_x -Ausfallrate von 5 % zugrunde zu legen. Dadurch wird rechnerisch davon ausgegangen, dass eine Komponente immer bereits zu dem Zeitpunkt ausgetauscht werden muss, zu dem gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung erst 5 % der Komponenten irreparabel versagt haben. Durch diese Annahme ist ein entsprechender Risikozuschlag inkludiert.
2a)	gering	RV	Der Kalkulation ist eine B_x -Ausfallrate von 5 % zugrunde zu legen. Dadurch wird rechnerisch davon ausgegangen, dass die Komponente immer bereits zu dem Zeitpunkt versagt, zu dem gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung erst 5 % der Komponenten funktionsuntüchtig geworden sind. Durch diese Annahme wird ein ausreichender Risikozuschlag berücksichtigt.
2b)	gering	ÜL	Der Kalkulation ist eine B_x -Ausfallrate in der Größenordnung der charakteristischen Lebensdauer T nach Weibull zugrunde zu legen. Es ist bei der Ermittlung der Folgekosten allerdings mit einzubeziehen, dass für die „Überbrückungslösung“ die doppelte Anzahl an Austauschvorgängen je Komponente anfällt. Zudem muss das Überbrückungsbauteil ebenfalls instand gehalten, ggf. ersetzt und vorgehalten (Räumlichkeiten) werden.
2c)	gering	FW	Der Kalkulation ist eine B_x -Ausfallrate von 5 % zugrunde zu legen. Dadurch wird rechnerisch davon ausgegangen, dass eine Komponente immer bereits zu dem Zeitpunkt versagt, zu dem gemäß der Wahrscheinlichkeitsverteilung erst 5 % der Komponenten funktionsuntüchtig geworden sind. Räumlichkeiten zur Lagerung neuer Komponenten sind vorzuhalten. Problematisch ist der Wertverlust neuwertiger Bauteile ohne Nutzung.

Tabelle 22: Empfehlungen für die Abschätzung theoretischer Nutzungsdauern

4.4.5.3 Bauteilkosten und Projekterlöse

Da sich die Lebenszykluskostenanalyse aus Ein- und Auszahlungen zusammensetzt, ist der Fluss der Zahlungsmittel zwingend auf einen Referenzzeitpunkt zu beziehen. Sinnvollerweise fällt dieser Zeitpunkt mit dem Beginn der Nutzungsperiode eines Bauwerks zusammen. Wird für ein Bestandsbauwerk ein Paradigmenwechsel vollzogen und fortan das Lebenszykluskostenkonzept angewendet, so kann der Referenzzeitpunkt auch einem Zeitpunkt entsprechen, der in der vorangeschrittenen Betriebsphase liegt.

Ein bedeutender Stellenwert geht von der Ermittlung der Kosten aus, die für die Planung und die Erstellung eines Tunnelbauwerks aufzuwenden sind. Diese Summe ist stets vor Erreichen des Referenzzeitpunktes zu benennen. Somit wird die Summe aus Planungs- und Bauerstellungskosten, also die Initialkosten, auf den Fertigstellungstermin projiziert. Im Weiteren stellen die Initialkosten im Gegensatz zu einer konventionellen Projektabwicklung nach dem „design-bid-build“-Ansatz bei der lebenszykluskostenbasierenden Abwicklung die Basis zur Ableitung der Folgekosten dar.

Die Benennung sämtlicher Initialkosten zur Erbringung der Bauleistung und zur Beschaffung der betriebstechnischen Tunnelausstattung muss somit in der jeweiligen Planungsstufe auf Grundlage des bis dahin erreichten Detaillierungsgrades gewissenhaft betrieben werden. Normalerweise sind der Zeitpunkt der Kostenermittlung und die Basis für die Ermittlung der Marktpreise identisch. Zeichnet sich jedoch ab, dass diese Marktpreise beispielsweise aufgrund erst noch zu treffender politischer Entscheidungen oder infolge Verzögerungen bis zum Zeitpunkt der Baufertigstellung nicht ihre Gültigkeit behalten werden, sind Preis Anpassungen einzukalkulieren. Insbesondere bei Infrastrukturprojekten, die einem Planfeststellungsverfahren unterliegen, kann die Konzeptionsphase ohne Aussicht auf eine baldige Baurealisierung durchaus die Zeitspanne eines Jahrzehnts einnehmen. Auch für den Fall, dass bereits eine positive Realisierungsentscheidung vorliegt, sind die im Tunnelbau als gängig anzusehenden Zeitspannen bis zur endgültigen Inbetriebnahme häufig in der Größenordnung eines halben Jahrzehnts angesiedelt. Als Randbemerkung sei ergänzt, dass zeitlich ausgedehnte Planungsphasen durchaus dem Leitgedanken der lebenszyklusbasierenden Vorgehens-

weise entsprechen können: Denn nur eine strukturierte Betrachtung von Abhängigkeiten kann schließlich dazu führen, eine wirtschaftlich-effiziente Bauwerksplanung zu erzielen.

Die Ein- und Auszahlungsgrößen, die in die Lebenszykluskostenanalyse einfließen, sind grundsätzlich Nettobeträge. Diese Festlegung ermöglicht es, zukünftige Änderungen der Mehrwert- und Umsatzsteuersätze zu ignorieren. Insbesondere der Vergleich der aus der Lebenszykluskostenanalyse hervorgehenden Gesamtkosten für unterschiedliche Projektalternativen hat vor diesem Hintergrund zu erfolgen. Des Weiteren wird die Festlegung getroffen, dass Einzahlungen mit einem positiven Vorzeichen und Auszahlungen mit einem negativen Vorzeichen versehen werden. Diese Konvention ist konsequent zu verfolgen, anderenfalls sind die Berechnungsergebnisse fehlerbehaftet oder können zu Fehlinterpretationen führen.

Neben der oben erläuterten Ermittlung der Initialkosten steht die Fortschreibung der Folgekostenanteile im Fokus. Die Folgekostenanteile umfassen einerseits Energiekosten zum Betrieb, Kosten zur Instandhaltung und Funktionserhaltung, sowie Kosten zur Wiederbeschaffung irreparabler Bauteile und Komponenten. Folgekosten lassen sich aus den Initialkosten ableiten, indem ihre Zusammensetzung analysiert und zeitlich bedingte Preisveränderungen durch geeignete Preisindizes rechnerisch kompensiert werden. Den Ansatzpunkt für diese Analyse stellt die Berücksichtigung von Preissteigerungen dar. In Abbildung 44 ist die Entwicklung verschiedener Preisindizes über unterschiedlich lange Beobachtungszeiträume aufgezeigt. Sämtliche Kurven schneiden sich in einem identischen Punkt, dem Ordinatenwert von 100 % im Jahr 2000. Anhand dieses willkürlich gewählten Wertepaares ist es sofort möglich, die Charakteristiken der Kurvenverläufe miteinander zu vergleichen. Der Betrachter der Abbildung erkennt beispielsweise, dass die Preise für gewerbliche Produkte im Zeitraum zwischen 2000 und 2011 eine raschere Steigerung als das Preisniveau im Straßenbau erfahren haben. Die Preissteigerung für elektronische Erzeugnisse ist indes im selben Zeitraum negativ verlaufen. Die beispielhaft in Abbildung 44 dargestellten Preisindizes sind den vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Berichten [150] entnommen. Derartige Zeitreihen stellen eine wichtige Basis zur Dokumentation des Kaufkraftverlustes dar. Erfasst der Verbraucherpreisindex die Preisentwicklung von Waren, die das durchschnittliche Konsumverhalten der Bundesbürger widerspiegelt, so erfassen weitere Preisindizes den Kaufkraftverlust in anderen Wirtschaftsbereichen.

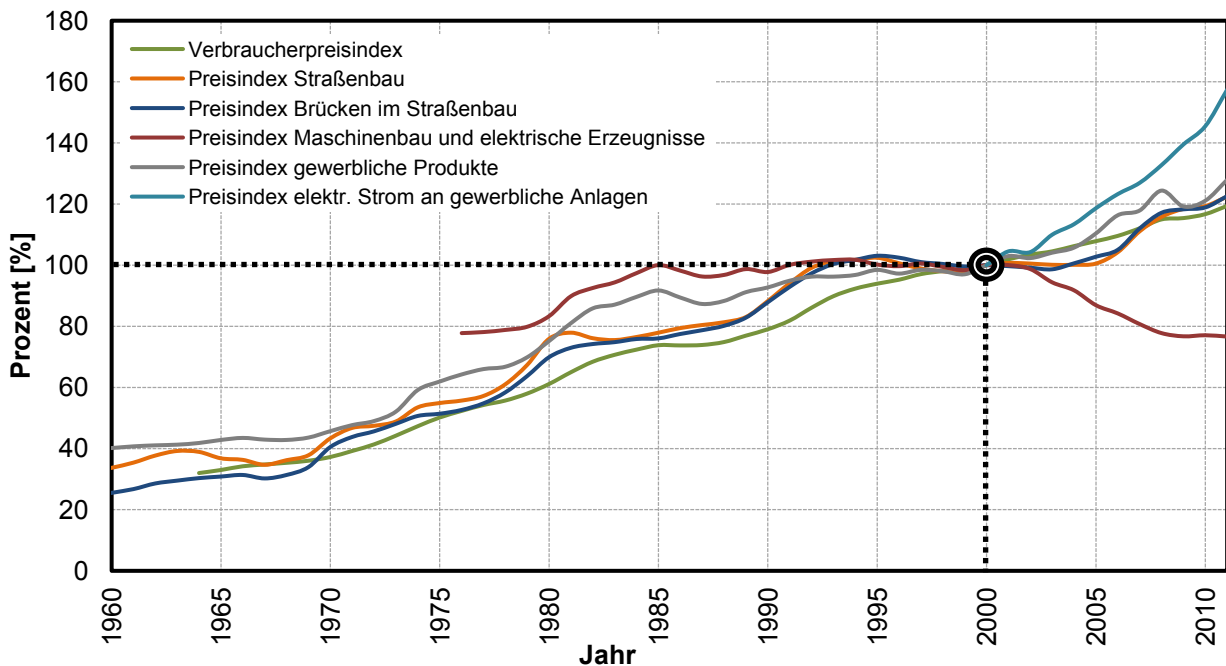


Abbildung 44: Entwicklung verschiedener Preisindizes (2000 = 100 %), nach [150]

Neben der Aussage zum zurückliegenden Kaufkraftverlust stellen die Preisindizes für die auf die Zukunft ausgerichtete Lebenszykluskostenanalyse eine wertvolle Datengrundlage bereit. Wie bereits an früherer Stelle erläutert, sieht die gewählte Systematik vor, dass jedem Kosten- und Erlösanteil im Zuge der Lebenszykluskostenanalyse genau ein Zeitpunkt am Ende eines Kalenderjahres zugeordnet wird. Um den Einfluss zwischen dem gewählten Referenzzeitpunkt der Lebenszykluskostenanalyse und dem Zeitpunkt der Kosten- oder Erlöszurechnung abzubilden, sind die Differenzen zwischen den Preisindizes ebenfalls auf eine Jahresbasis zu beziehen. Für die in Abbildung 44 aufgetragenen sechs Preisindizes sind in den Diagrammen (a) bis (f) der Abbildung 45 die jährlichen Veränderungen der einzelnen Indizes angegeben. Für jeden einzelnen Index sind sodann, wie ebenfalls in Abbildung 45 gezeigt, willkürlich obere und untere Grenzen festgelegt worden. Im Zuge von Sensitivitätsanalysen sind die Konsequenzen, die aus der Anwendung der jeweiligen Grenzwerte hervorgehen, zu bewerten.

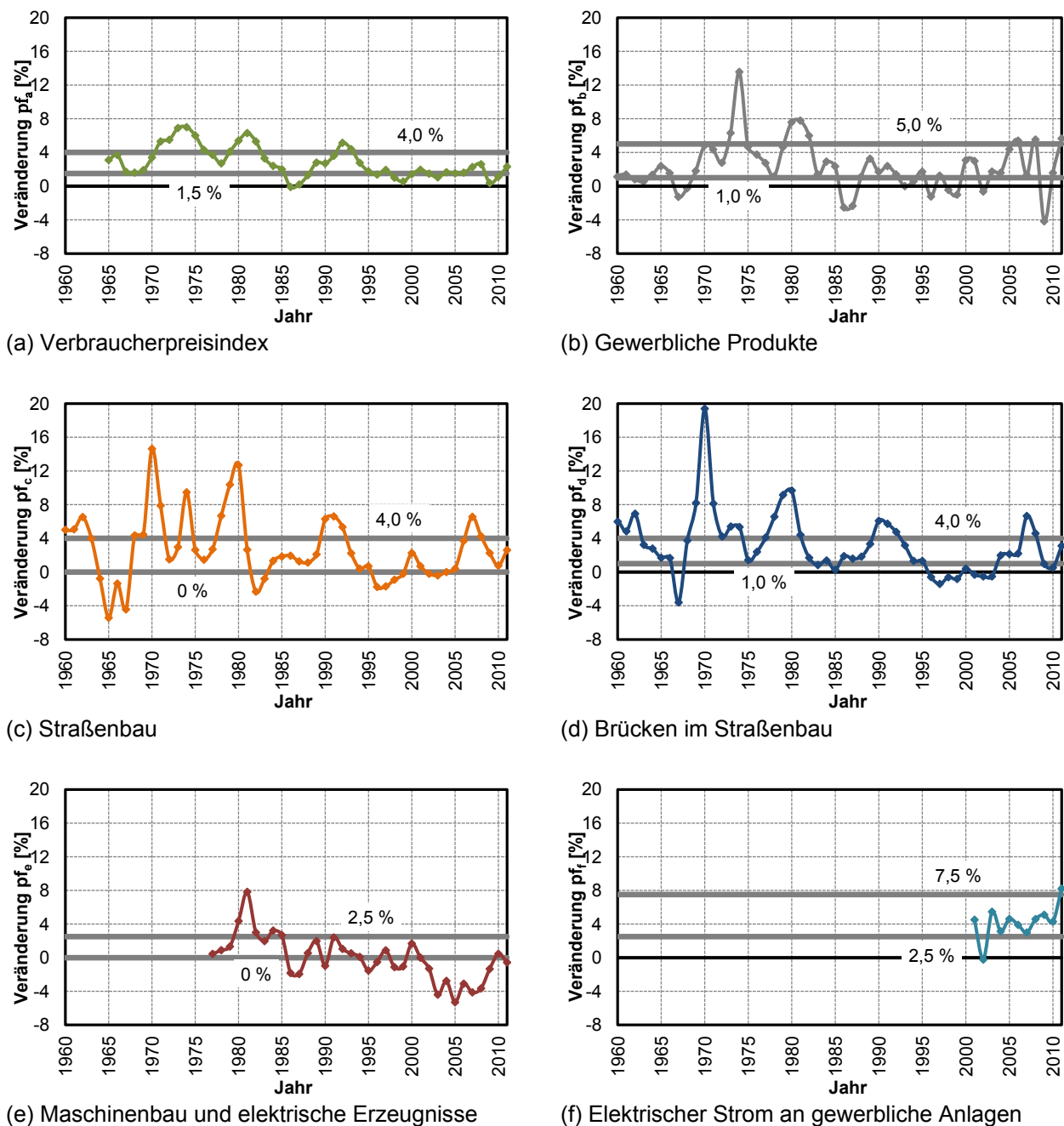


Abbildung 45: Entwicklung der jährlichen Veränderungen pf_i [%] einzelner Preisindizes, nach [150]

Neben den dargestellten Preisindizes werden durch das Statistische Bundesamt weitere Indizes ermittelt, regelmäßig fortgeschrieben und über den Internetauftritt (www.destatis.de) publiziert. Für die Anwendung im Straßentunnelbau und -betrieb wird davon ausgegangen, dass die Preisentwicklung bei der Erstellung des Rohbaus eng an die Preisentwicklung im Straßen- und Brückenbau angelehnt ist. Zur Einschätzung der Preisentwicklung technischer Ausstattungselemente sollte der Preisindex für gewerbliche Produkte genutzt werden. Der zusätzlich dargestellte Preisindex für Maschinenbau und elektronische Erzeugnisse wird nach Ansicht des Verfassers maßgeblich durch die Preisentwicklung in der Unterhaltungselektronik beeinflusst und sollte daher nicht für technische Bauteile und elektronische Spezialgeräte, die im Tunnelbau zur Anwendung kommen, genutzt werden. Ein weiterer Preisindex gibt die Entwicklung der Strompreise für die Betreiber gewerblicher Anlagen wieder.

Neben den zuvor dargestellten und in der Lebenszykluskostenanalyse zwingend zu berücksichtigenden Auswirkungen der Preissteigerung können die folgenden Einflüsse dazu führen, dass Bauteilkosten einer zeitlichen Veränderung unterliegen:

- technische Weiterentwicklungen,
- veränderte Konkurrenzsituation bzw. allgemeines Marktumfeld,
- Skonto bzw. Mengenrabattierung,
- veränderte Fracht- oder Zollbestimmungen,
- Entsorgungskosten, Verkaufserlös oder Schrotterlös für irreparable Bauteile.

Die genannten Einflüsse sind, sollten gewichtige Gründe vorliegen, mit in die Berücksichtigung von Preisveränderungen inkludiert werden.

Bei Erlösen, die aus Mauteinnahmen resultieren, ist die Preisanpassung der Maut an den Verbraucherpreisindex zu koppeln. Ein separater risikoabhängiger Zuschlag ist dann geboten, wenn das Verkehrsmengenrisiko im Zuge eines ÖPP-Projektes beim privaten Investor verbleibt. Liegen gesicherte Erkenntnisse zu den zu erwarteten Verkehrsströmen vor oder handelt es sich um ein Bestandsbauwerk, für das auf Beobachtungsdaten zurückgegriffen werden kann, ist eine Abschwächung des Risikozuschlags gerechtfertigt.

4.4.5.4 Kapitalzinssatz in der Investitionsrechnung

Wie in Abschnitt 3.5.3 erklärt, basiert die Berechnung der Lebenszykluskosten auf den Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung. Damit wird die Annahme getroffen, dass eine Geldsumme in Zukunft einen geringeren Wert als heute aufweist. Durch den Verzinsungsansatz wird der in Abschnitt 4.4.4 beschriebene Zeitwert des Geldes zum Ausdruck gebracht; dieser bildet das Rückgrat des gesamten modernen Finanzwesens. Wie Götze [85] betont, erfüllt der Kapitalzinssatz vor allem zwei Funktionen: „Zum einen soll mit seiner Hilfe Vergleichbarkeit zwischen den Alternativen hergestellt, zum anderen sollen die gegenwärtigen und zukünftigen Investitionsmöglichkeiten erfasst werden“.

Wie Ferry und Flanagan [68] anmerken, besteht in der Festlegung eines geeigneten Kapitalzinssatzes die vielleicht schwierigste Aufgabe. Gleichwohl wird erst mit der Bestimmung eines Zinssatzes die Durchführung einer Lebenszykluskostenanalyse, sofern sie auf einem dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung beruht, ermöglicht. Die Wahl eines Zinsfaktors kann alle übrigen zu treffenden Entscheidungen derart beeinflussen, dass sich die resultierende Rangfolge alternativer Untersuchungsvarianten verändern kann. Wird ein hoher Zinssatz gewählt, wirken sich geringe Investitionskosten und hohe wiederkehrende Kosten begünstigend auf den Kapitalwert aus. Dies erscheint auch schlüssig, denn eine hohe Verzinsung des Anfangskapitals ist zwar einerseits wünschenswert, auf der anderen Seite mit steigender Höhe aber auch zunehmend realitätsfern. Wie Herzog in [96] zum Ausdruck bringt, werden Zahlungen „umso höher bewertet, je früher sie entstehen. Dies hängt mit der Möglichkeit zusammen, Kapital zinsbringend anzulegen bzw. gegen die Bezahlung von Zinsen aufzunehmen“.

Dieser Zusammenhang soll anhand eines einfachen Rechenbeispiels erläutert werden: Für die Installation des fiktiven Bauteils A.15 werden mit der Inbetriebnahme des Bauwerks zum Referenzzeitpunkt Initialkosten in Höhe von 10 Geldeinheiten [GE] aufgewendet. Bis zum planmäßigen Austausch des Bauteils im sechsten Betriebsjahr werden jährlich konstant 3 % der Initialkosten für Betrieb und Instandhaltung verauslagt. Mit Beginn des sechsten Betriebsjahres wird ein funktionsidentisches Bauteil für 11 GE beschafft und wiederum unter Ansatz von jährlich 3 % der Wiederbeschaffungskosten betrieben und instand gehalten. Es wird angenommen, dass mit Ablauf des zehnten Betriebsjahres der Lebenszyklus des Bauwerks sein Ende erreicht. Für die Kapitalzinssätze von 3 bzw. 4 % p.a. werden, wie in Tabelle 23 gezeigt, anschließend die auf den Referenzzeitpunkt (RZP) bezogenen Barwerte sowie die beiden resultierenden Kapitalwerte errechnet. Dazu werden zunächst alle Auszahlungen ihren genauen Entstehungszeitpunkten zugeordnet. Im Anschluss werden für jeden Zeitpunkt die Summen der nominalen Zahlungsströme gebildet und unter Implementierung des entsprechenden Zinssatzes die jeweiligen Barwerte (BW) errechnet. Die Bestimmung der Barwerte erfolgt gemäß der in Abbildung 24 aufgezeigten Diskontierungssystematik. Aus der Summierung aller für einen Zinssatz ermittelten Barwerte geht schließlich der in der letzten Tabellenspalte aufgeführte Kapitalwert (KW) hervor.

Zahlungen	t_a [Jahr]	0 (RZP)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Erstinstallation [GE]		-10,00											
Austausch [GE]								-11,00					
Betrieb + Instandhaltung [GE]			-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	
Summe S_a [GE]		-10,00	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-11,33	-0,33	-0,33	-0,33	-0,33	
Ermittlung Barwerte (BW) mittels Diskontierung												KW = $\sum BW_a$	
für $i = 3\%$:													
$BW_a = S_a \cdot (1 + 0,03)^{-t_a}$		-10,00	-0,29	-0,28	-0,27	-0,27	-0,26	-9,49	-0,27	-0,26	-0,25	-0,25	-21,89
für $i = 4\%$:													
$BW_a = S_a \cdot (1 + 0,04)^{-t_a}$		-10,00	-0,29	-0,28	-0,27	-0,26	-0,25	-8,95	-0,25	-0,24	-0,23	-0,22	-21,24

Tabelle 23: Beispiel zur Wahl unterschiedlicher Kapitalzinssätze

Im ersten Fall beträgt der Kapitalwert -21,89 GE, im zweiten Fall -21,24 GE. Das Ergebnis kann folgendermaßen interpretiert werden: Mit steigendem Kapitalzinssatz steigt das Risiko, dass der Investor nicht in der Lage ist, die Finanzierung für das Bauteil A.15 über die Dauer von 10 Jahren sicherzustellen. Der Betrag des Kapitalwerts für die zweite Alternative ist folglich geringer als für die erste Alternative. Hieraus erwächst für den Investor bezüglich des Referenzzeitpunktes die Forderung, unter Annahme eines höheren Kapitalzinssatzes auch eine höhere Verzinsung zur Anlage des im zweiten Fall errechneten Kapitalwerts zu erzielen. Ist es dem Investor nicht möglich, den der Berechnung zugrunde gelegten Kapitalzinssatz zu erreichen, so ist die gesamte Projektfinanzierung in Gefahr. Die Wahl eines Kapitalzinssatzes ist somit risikobehaftet und vor diesem Hintergrund gewissenhaft durchzuführen.

Während sich der Kapitalwert im zuvor aufgezeigten Beispiel lediglich aus Auszahlungen zusammensetzt, können Einnahmen dazu führen, dass der Kapitalwert über die Dauer des gesamten Bauwerkslebenszyklus auch positive Werte annimmt. Bei einem Renditeprojekt ist es gar eine zwingende Forderung, dass der Kapitalwert einen positiven Wert aufweist, anderenfalls ist von der Investition abzuraten. Werden nach Kruschwitz [116] unter den Soll-Zinsen die durchschnittlichen zukünftigen Finanzierungskosten verstanden, so handelt es sich bei den Haben-Zinsen um die durchschnittliche zukünftige Rendite, von denen der Investor glaubt, sie erwirtschaften zu können. Die Anwendung der Kapitalwertmethode basiert auf der Annahme, dass Soll- und Haben-Zinssatz identisch sind und durch einen einzigen Kapitalzinssatz ausgedrückt werden. Besteht zudem kein Finanzierungslimit – kann also unbegrenzt Kapital am Markt aufgenommen werden – so sind die in der Investitionsrechnung häufig anzutreffenden Voraussetzungen eines „vollkommenen und unbeschränkten Kapitalmarktes“ (vgl. Abschnitt 3.5.3) erfüllt.

Es existieren nach Herzog [96] bzw. Götze [85] grundsätzlich drei verschiedene Ansätze, den einheitlichen Kapitalzinssatz für eine Lebenszykluskostenanalyse festzulegen:

- Ableitung aus den Finanzierungskosten; hierbei wird zwischen der Eigen-, der Fremdfinanzierung bzw. der Mischung aus Eigen- und Fremdfinanzierung unter Verwendung eines gewichteten Mittelwertes unterschieden.
- Der Vergleich von Investitionsobjekten kann auch unter der Zuhilfenahme sogenannter Opportunitätskosten erfolgen; hierzu werden zur Bestimmung des Kapitalzinssatzes Verzinsungen alternativer Investitionsobjekte herangezogen.
- Vorgabe einer Zielrendite, die unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen erreicht werden soll.

Da es sich bei Tunnelprojekten überwiegend um öffentlich finanzierte, in wenige Fällen aber auch um öffentlich-privat finanzierte Vorhaben handelt, ist nach den Ausführungen von Littwin et al. [121] die Verwendung möglichst aktueller Werte aus der Zinsstrukturkurve zu empfehlen. Nach Hewicker und Cremers [97] stellt eine Zinsstrukturkurve die jeweils geltenden Zinssätze für kurz-, mittel- und langfristige Anlagen grafisch dar. Die Zinsstrukturkurve gibt zu jedem beliebigen Zeitpunkt Auskunft über den Marktzinssatz und kann, so Hewicker und Cremers [97] weiter, unterschiedliche Verlaufsformen annehmen: Bei einem gleichmäßig ansteigenden Verlauf sind die kurzfristigen Zinsen niedriger als die langfristigen und der Verlauf wird als normal bezeichnet. Verläuft die Zinsstrukturkurve fallend bzw. invers, sind die langfristigen Zinsen niedriger als die kurzfristigen. Der Verlauf der Zinsstrukturkurve wird als flach beschrieben, wenn die Zinsen für kurze und lange Laufzeiten gleich sind. Eine Zinsstrukturkurve stellt nur eine Momentaufnahme dar und verändert mit der Zeit ihre Erscheinungsform.

Wie beispielsweise bei Herzog [96] oder im Leitfaden „PPP im öffentlichen Hochbau“ des Bundesministeriums für Bau, Verkehr und Wohnungswesen [35] nachgelesen werden kann, sind quasi risikolose Anlageformen dazu geeignet, die untere Grenze des Kapitalzinssatzes zu bestimmen. In den „Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrichtlinien“ der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [118] wird erklärt, dass „im Rahmen der periodischen Fortschreibung der Bundesverkehrswegeplanung umfangreiche wirtschaftswissenschaftliche Untersuchungen angestellt wurden“, den für technische Infrastrukturmaßnahmen anzusetzenden Kapitalzinssatz zu beurteilen. Unter Abstimmung zwischen Bund und Ländern erfolgte die Festlegung eines Standardwertes, der eine Höhe von real 3 % p.a. besitzt. Hieraus wird die Empfehlung abgeleitet, im Rahmen von Sensitivitätsanalysen eine Bandbreite für den Kapitalzinssatz von real 2 bis 5 % p.a. zu untersuchen und die entsprechenden Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit zu beurteilen. Reale Zinssätze werden genutzt, da Preisveränderungen, wie in Abschnitt 4.4.5.3 beschrieben, im Zusammenhang mit den Kosten- und Erlösgrößen betrachtet werden.

Zusammenfassend sei angemerkt, dass die Wahl des Kapitalmarktzinses dadurch relativiert wird, dass alternative Projektvorhaben immer auf der Basis identisch hoher Zinssätze verglichen werden. Dies bedeutet aber auch, dass die Prognoseunsicherheit, die von der Wahl des Kapitalzinssatzes ausgeht, auf alle Varianten gleichermaßen zutrifft. Unterschiede zwischen den Varianten treten allenfalls dadurch zutage, dass ungleiche Zahlungsreihen unterschiedliche Konsequenzen hervorrufen.

5 Entwicklung eines Modells zur Analyse der Lebenszykluskosten

5.1 Leitgedanke und Zielstellung

Mit der Entwicklung eines Modells zur Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken sollen die folgenden zwei Hauptziele verfolgt werden: Zum ersten kann die Analyse der Lebenszykluskosten dazu beitragen, Entscheidungsprozesse während einer frühen Planungsphase zu unterstützen, zum zweiten besteht für Tunnelbauwerke, die zu einem früheren Zeitpunkt in Betrieb gegangen sind, die Möglichkeit, Effizienzgewinne hervorzubringen.

Zunächst soll der erste Fall näher untersucht werden; die Anwendung des Analysemodells liegt dabei im Verantwortungsbereich des Bauherrn bzw. bei dessen Planungsvertretern. Aufwendungen für die Bauwerkserstellung, aber insbesondere auch die langfristig anfallenden Kosten für den Betrieb eines Tunnels sind Gegenstand von Variantenstudien. Aus frühen Planungsphasen, die auf dem Lebenszykluskostenkonzept beruhen, können somit optimierte Ausschreibungsunterlagen hervorgehen. Gelingt es dem Bauherrn, wenn dieser später nicht der Betreiber ist, in einer frühen Phase den späteren Betreiber des Tunnelbauwerks in die Planungsphase zu involvieren, so werden darüber hinaus an der Schnittstelle zwischen dem Bauherrn und dem Betreiber weitere Effizienzgewinne geschaffen.

Besteht die Absicht, ein Tunnelprojekt auf Grundlage eines konventionellen Bauvertrags abzuwickeln, so kann auch ein potentieller Anbieter von Bauleistungen von der Anwendung der Lebenszykluskostenanalyse profitieren. Auf Grundlage der lebenszykluskostenorientierten Betrachtungsweise können so optimierte Ausschreibungsentwürfe oder Nebenangebote entstehen. Schlagen sich diese Vorteile nicht unmittelbar in den Initialkosten nieder, so besteht seitens des Bieters die Möglichkeit, dem Bauherrn langfristige Einsparpotentiale der Folgekosten aufzuzeigen. Gelingt es dem Bieter, eine logische Argumentationskette darzulegen, so kann sich dieser einen Wettbewerbsvorteil verschaffen.

Bei Tunnelprojekten, die als ÖPP-Projekte ausgeführt werden sollen, ist es für beide Vertragspartner unbedingt ratsam, eine Lebenszykluskostenanalyse durchzuführen. Für den Auftraggeber können sich daraus wichtige Rahmenbedingungen ableiten, beispielsweise die Ermittlung der Höhe einer Anschubfinanzierung durch die öffentliche Hand zum Projektstart oder die Festschreibung des Bauwerkszustandes, zu dem mit Ablauf der Konzessionsperiode das Bauwerk in den Verantwortungsbereich der öffentlichen Hand übergeht. In hohem Maße ist die Lebenszykluskostenanalyse aber auch für den Bieter von ÖPP-Leistungen von Interesse. Aus der Perspektive eines privaten Anbieters wird die Zielstellung verfolgt, mit dem eingebrachten Eigenkapital zum Ablauf des Konzessionszeitraumes eine angemessene Rendite zu erwirtschaften. Das Vorteilhaftigkeitskriterium lautet somit, dass der Kapitalwert zum Ende des Betrachtungshorizonts einen positiven Wert einer bestimmten Höhe aufweisen muss. Akquiriert ein Anbieter ein ÖPP-Projekt, so beginnt unmittelbar mit der Vertragsvereinbarung die zweite Stufe der Lebenszykluskostenanalyse. Vergleichbar zum Stellenwert der Arbeitskalkulation nach Erteilung eines Bauauftrags muss der Konzessionsnehmer seine Planungen sukzessive verfeinern, den herrschenden Gegebenheiten anpassen und das Lebenszykluskostenmodell fortlaufend mit aktualisierten Informationen ausstatten. Über die Planungs- und Bauphase hinaus können allerdings nur dann die Ziele erreicht werden, wenn das Modell auch während der Betriebsphase zur Anwendung kommt. Somit nimmt die Lebenszykluskostenanalyse auch insbesondere nach Beginn der Betriebsphase eines Tunnels die Funktion eines Steuerungselementes an. Entwicklungen, die von den Soll-Werten abweichen, werden auf diese Weise identifiziert und es können zeitnah geeignete Korrekturmaßnahmen eingeleitet werden.

In ähnlicher Weise erfolgt die Anwendung der Lebenszykluskostenanalyse für den zu Beginn dieses Abschnittes skizzierten zweiten Fall. Voraussetzung hierbei ist, dass für das zu untersuchende Tunnelbauwerk ein Paradigmenwechsel zugunsten des lebenszykluskostenorientierten Betriebs vollzogen wird. Eine wichtige Grundlage bilden die in die Analyse eingehenden Parameter, für die bereits eine Datenhistorie vorliegt

und die weitere Planung somit substantiell unterstützen. Mutmaßlich werden dem Zeitpunkt, zu dem die lebenszykluskostenorientierte Betrachtung beginnen soll, bauliche oder die technische Ausstattung des Tunnels betreffende Maßnahmen vorausgehen. Wiederum sind die potenziellen Anwender der Lebenszykluskostenanalyse Bauherrn, Betreiber und Anbieter von Bau- und Betreiberleistungen. Das beschriebene Szenario ist auch dann als Modell abbildbar, wenn ein Bestandstunnel in eine ÖPP-Streckenführung integriert werden soll.

Der Entscheidung zur Realisierung eines Tunnelprojekts geht häufig eine kontroverse Diskussion auf politischer Ebene, aber auch innerhalb der Bevölkerung voraus. Dabei besteht die grundsätzliche Gefahr, dass Projekte auf die Höhe der Initialkosten reduziert werden und weitere relevante Vorteilhaftigkeitskriterien, wie volkswirtschaftliche oder umweltrelevante Gesichtspunkte, zu wenig Beachtung geschenkt werden. Die Lebenszykluskostenbetrachtung hingegen bietet Unterstützung dabei, nicht nur kurz-, sondern insbesondere auch langfristige Kosten offenzulegen und den Nutzen transparent aufzuzeigen. Es ist beispielsweise in Betracht zu ziehen, langfristige Kosten, die aus der Beibehaltung des Status quo resultieren, den Kosten für die Realisierung eines Tunnels gegenüberzustellen. Auch eine Reihe weiterer Vergleiche zwischen Tunnelösungen und oberirdisch geführten Verkehrswegen, welche im Übrigen stets eine längere Streckenführung als eine Tunnellösung erfordern, können in diesem Zusammenhang erfolgen.

5.2 Investitionsrechnung

5.2.1 Erforderliche Leistungsfähigkeit

Die Methoden der Investitionsrechnung müssen die Leistungsfähigkeit besitzen, aus verschiedenen Blickwinkeln die Lebenszykluskostenanalyse für Straßentunnelbauwerke abbilden zu können. Die Anforderungen, die an ein geeignetes Analyseinstrument gestellt werden, führen zu der Formulierung der folgenden Prämissen:

- die Anwendung muss bereits von der frühesten Entwicklungsphase an möglich sein,
- ein zunehmender Planungsfortschritt muss sich darin widerspiegeln, dass eine sukzessive Verfeinerung von Eingabeparametern unterstützt wird,
- sobald die Vorteilhaftigkeit einer Projektvariante feststeht und eine Entscheidung zur Realisierung getroffen wurde, muss die konsequente Fortschreibung aller Daten über ggf. bereits begonnene sowie alle folgenden Lebenszyklusphasen erfolgen,
- soll die Anwendung des Berechnungsinstrumentes für ein Projekt erfolgen, das sich in einer fortgeschrittenen Lebenszyklusphase befindet, so ist zunächst der Status quo des Bestandsbauwerkes abzubilden,
- für die Festlegung von Eingangsparametern müssen ggf. ergänzende Berechnungsinstrumente zur Anwendung kommen; auf diese Weise gewonnene Zwischenergebnisse sind anschließend als Eingangsparameter in das Berechnungsmodell zu implementieren.

Um die beschriebenen Anforderungen zu erreichen, ist ein strukturierter und dem Gedankengang des Anwenders chronologisch folgender Aufbau des Berechnungsinstrumentes vorzunehmen. Eine wichtige Grundvoraussetzung dafür, die planungsbegleitende Anwendung des Berechnungsinstrumentes in ihrer Effizienz zu steigern, ist die Etablierung einer loyalen Kommunikationsbasis, auf der der Informationsaustausch zwischen dem Bauherrn, dem späteren Betreiber und dem Planungsingenieur beruht. Anderenfalls besteht die Gefahr, dass die Interessen einzelner Beteiligten nicht beachtet und somit die Potentiale der lebenszykluskostenbasierenden Planung nicht gänzlich ausgeschöpft werden.

An die Berechnungsergebnisse werden die Forderungen gestellt, dass diese eine klare und übersichtliche Gliederung aufweisen, einen Variantenvergleich ermöglichen und eine auf wirtschaftlichen Gesichtspunkten beruhende Entscheidungsfindung unterstützen.

5.2.2 Konkretisierung der Methodik

Die Zielstellung dieses Abschnittes ist es, ein geeignetes Verfahren auszuwählen, das insbesondere für die Lebenszykluskostenanalyse von Tunnelbauwerken heranzuziehen ist. Aufgrund der langen Dauern von Bauwerkslebenszyklen und der damit verbundenen zeitlich heterogenen Ein- und Auszahlungsstruktur wurde die Anwendung der statischen Verfahren bereits in Abschnitt 3.5.3 ausgeschlossen. Unter den dynamischen Verfahren der Investitionsrechnung ist somit eine Entscheidung zwischen der Methodik der vollständigen Finanzplanung, der Kapitalwert- sowie der Annuitätenmethode zu treffen.

Ein vollständiger Finanzplan (VoFi) besteht aus einem sehr umfangreichen Tabellenwerk, das allerdings auch auf der Voraussetzung basiert, dass der Anwender möglichst frühzeitig über projektspezifische Informationen verfügt. So ist es neben der Zuordnung von Ein- und Auszahlungen ebenfalls erforderlich, Angaben zu Finanzierungen, Geldanlagen und der Abführung von Steuern zu machen. Während Ein- und Auszahlungen zu den originären Zahlungen gehören, bilden die derivaten Zahlungen die Seite der Geldbeschaffung und -anlage ab. Nach Hufnagel und Meßmann [101] zählen zu den Besonderheiten des vollständigen Finanzplans im Gegensatz zur Kapital- bzw. Annuitätenmethode, dass zeitlich variierende Zinssätze verwendet werden, die aller Voraussicht nach auf dem Kapitalmarkt erzielt werden können. Bei öffentlich finanzierten Infrastrukturprojekten ist ein derartiger Detaillierungsgrad in der Regel nicht zweckmäßig, da einerseits die Auszahlungen aus einem zuvor festgelegten Etat entnommen werden und andererseits die Einzahlungsseite üblicherweise einen untergeordneten Stellenwert aufweist: Bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten im engeren Sinne bleibt per Definition (vgl. Abschnitt 3.5.2) die Erlösseite gänzlich unberücksichtigt, so dass allenfalls ein Nutzen bei der Analyse der Lebenszykluskosten im weiteren Sinne zu erkennen ist. Jedoch ist auch für den zuletzt betrachteten Anwendungsfall nicht davon auszugehen, dass Einzahlungen für eine langfristige Geldanlage eingesetzt werden, vielmehr werden sie reinvestiert oder fließen wieder dem Haushaltsbudget zu. Zusammenfassend bedeutet dies, dass über die langen Betrachtungsdauern und unter Beachtung der Charakteristik der Finanzierung von Infrastrukturprojekten eine Differenzierung der Zinssätze unnötig, wenn nicht unmöglich ist. Charakteristisch für alle dynamischen Verfahren ist, dass die originären Zahlungen bezüglich Höhe und Zeitpunkt identisch sind. Werden nun – im Widerspruch zum eigentlichen VoFi-Konzept – Steuerzahlungen nicht als derivate sondern als quasi-originäre Größen angesehen, so könnten diese auch in modifizierter Weise in den übrigen dynamischen Verfahren Berücksichtigung finden. Götze [85] schlägt die Bruttomethode vor, bei der Ertragssteuern durch die Korrektur des Kalkulationszinssatzes erfasst werden. Danach ist auf den Gewinn einer Periode eine Steuer zu zahlen, deren Höhe sich proportional zum Gewinn verhält. Es sei aber angemerkt, dass bei der Analyse der Lebenszykluskosten von Infrastrukturvorhaben die Besteuerung einen untergeordneten Stellenwert einnimmt.

Die vollständige Finanzplanung ist ein komplexes Berechnungsverfahren und ermöglicht dem Anwender die übersichtliche Darstellung aller projektspezifischen Geldbewegungen. Wie zuvor erörtert wurde, ist mit der Anwendung der VoFi-Methodik gegenüber der dynamisch-klassischen Investitionsrechnung bei öffentlich finanzierten Infrastrukturprojekten keine signifikante Vorteilhaftigkeit verbunden. Anders ist dies hingegen bei ÖPP-Projekten, da die Finanzplanung eine grundlegend andere Zielstellung verfolgt. Aus Sicht des privaten Partners liegt das Bestreben darin, das investierte Kapital inklusive eines Gewinnzuschlages am Ende der Konzessionslaufzeit verzinst zurückzuerlangen. Die Differenzierung der Finanzierungsbedingungen spielt somit bei ÖPP-Projekten eine wichtige Rolle. Als Fazit lässt sich festhalten, dass die Kapitalwertmethode zur Anwendung der Lebenszykluskostenanalyse von Tunnelbauwerken ein geeignetes Berechnungsmodell darstellt. Diese Auffassung geht auch aus der Veröffentlichung der PIARC Arbeitsgruppe [135] hervor, die sich mit dem Betrieb und der Instandhaltung von Straßentunneln beschäftigt. Darüber hinaus kann es sinnvoll sein, die Verwendung der Kapitalwertmethode für ÖPP-Tunnelprojekte um Zahlungsreihen zu ergänzen, die sich auf einer zuvor erfolgten VoFi-Nebenrechnung stützen.

Nach Götze [85] stellt die Kapitalwertmethode „ohne Zweifel das in der wissenschaftlichen Literatur am meisten beachtete und am stärksten akzeptierte Verfahren der dynamischen Investitionsrechnung dar“. Ferry und Flanagan [68], Kishk et al. [109] und die GEFMA-Richtlinie 220-1 [79] führen ergänzend aus, dass Vorteilhaftigkeitsuntersuchungen im Sinne einer Lebenszykluskostenanalyse häufig auf die Methodik der Kapitalwertmethode aufbauen. Insbesondere um eine Lebenszykluskostenanalyse für Tunnelbauwerke zu ermöglichen, muss der Anwender die folgenden Informationen beschaffen bzw. aus den Projektrahmenbedingungen ableiten:

- Die auf den Bezugszeitpunkt der Lebenszykluskostenanalyse ggf. askontierten Auszahlungen, die zur betriebsbereiten Herstellung des Tunnelbauwerks (Initialkosten) aufgewendet wurden; diese Ermittlung ist insbesondere dann erforderlich, wenn das Kapitalwertmodell die Entwicklungs- und Bauphase inkludiert,
- Vorgabe der theoretischen Nutzungsdauern aller verbauten Betrachtungseinheiten (Komponenten bzw. Materialien) in Abhängigkeit von zuvor individuell definierenden Verfügbarkeitsgraden von Komponenten gleichen Typs,
- Folgekosten, bestehend aus Aufwendungen für Betrieb, Instandsetzung und Instandhaltung des gesamten Tunnelbauwerks; hierin sind auch Nebenanlagen zu inkludieren,
- etwaige monetäre Rückflüsse, bspw. aus Mauteinnahmen,
- die Höhe von Liquidationserlösen bzw. -kosten am Ende der Nutzungsdauer (Verkauf, Außerbetriebnahme etc.),
- ein Kalkulationszinssatz, ggf. unter Beachtung einer Schwankungsbreite.

Die Kapitalwertmethode ermöglicht die Annäherung an die Realität und stellt ein in den Betriebswissenschaften entwickeltes Modell dar. Mit Abbildung der Realität als Modell ist die zwingende Notwendigkeit verknüpft, vereinfachende Annahmen zu treffen. Die Annahmen, die mit der Anwendung der Kapitalwertmethode einhergehen, sind bei Götze [85] beschrieben. Wichtige und relevante Aspekte sollen im Folgenden hervorgehoben werden.

Der Einsatz der Kapitalwertmethode setzt zunächst voraus, dass eine Beurteilung von Investitionsalternativen ausschließlich im Hinblick auf die Zielgröße „Kapitalwert“ erfolgt. Existieren weitere, nicht monetär beschreibbare Zielgrößen, so erfolgt parallel – oder ggf. auf die Ergebnisse der Kapitalwertmethode aufbauend – eine Entscheidung auf Basis der Anwendung multikriterieller Modelle. In Abschnitt 3.5.3 wurden derartige Parameter, die außerhalb der Verfahren der Investitionsrechnung verarbeitet werden, unter dem Stichwort „Imponderabilien“ eingeführt. Multikriterielle Modelle werden auch als Mehrzielverfahren bezeichnet und können für den Tunnelbau bzw. -betrieb Aspekte des Umweltschutzes, der Nachhaltigkeit oder der Verkehrsmengenumlagerung anhand von nicht-monetären Kennwerten vergleichend bewerten. Weitergehende Ausführungen zu den multikriteriellen Verfahren sowie deren Anwendung im Tief- und Tunnelbau finden sich in einer Publikation der Deutschen Bundesstiftung Umwelt [45] sowie bei Thewes et al. [156].

Die Lebenszykluskosten für Straßentunnel wird in der Regel vom Baulastträger vorgegeben. Anhaltspunkte zur Bestimmung können Restnutzungsdauern des Rohbaus, Laufzeiten von Konzessionen oder pauschale Größenordnungen für die zu erwartende Nutzungsdauer bei vergleichbaren Tunnelbauwerken sein. Gewöhnlich weisen die zu bewertenden Alternativen dieselben Lebenszykluskosten auf, anderenfalls muss der errechnete Kapitalwert unter Implementierung der Annuitätenmethode weitergehend interpretiert werden. Die Annuitätenmethode ermöglicht es, wie in Formel 3.5 gezeigt, den gesamten Kapitalwert auf eine jährliche Basis zu beziehen.

Die Kapitalwertmethode kommt nur dann zur Anwendung, wenn keine Interaktionen zu anderen, parallel geplanten Investitionsobjekten hergestellt werden können. Bei anderen Investitionsobjekten handelt es sich ausdrücklich nicht um Investitionsalternativen, sondern um auf den ersten Blick unabhängige Investitionen in andere Bauwerke. Nach Götze [85] können diese Interaktionen durch die Kapitalwertmethode nicht berücksichtig

sichtigt werden, vielmehr wird hier auf die Leistungsfähigkeit sogenannter Simultanplanungsmodelle verwiesen. Da Tunnelbauwerke in der Regel Alleinstellungsmerkmale aufweisen, ist nicht davon auszugehen, dass derartige Interaktionen für den beabsichtigten Anwendungsfall eine große Relevanz besitzen. Ein praxisrelevantes Beispiel ist die Verringerung von Mauteinnahmen bei einem ÖPP-Tunnelprojekt, wenn alternative, unbemannte Fahrwege geschaffen werden und zu einem veränderten Nutzerverhalten bezüglich der Anzahl der Tunneldurchfahrten führen.

Sämtliche Daten, die Eingang in die Investitionsrechnung finden, sind mit Unsicherheiten behaftet. Die Sicherheit der Daten ist nach Götze [85] „bei Investitionsentscheidungen in der Realität nicht gegeben“. Es wird bei bedeutenden Investitionsprojekten – dazu sind Tunnelbauwerke hinzuzuzählen – empfohlen, eine Analyse der Auswirkungen von Unsicherheiten der prognostizierten Daten durchzuführen. In Abschnitt 4.4 wurde dieser Forderung bereits Rechnung getragen, indem die für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln relevanten und in Tabelle 21 in die Gruppen 1 bis 3 gestaffelten Eingangsgrößen beurteilt wurden.

Bei der Kapitalwertmethode sind sämtliche Zahlungen bestimmten Zeitpunkten zuzurechnen. Standardmäßig beträgt der Abstand zwischen den Zahlungszeitpunkten ein Jahr, so dass nicht nur die eigentlichen Zahlungsdaten Unsicherheiten aufweisen, sondern auch infolge der Weiterverarbeitung weitere vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen. Eine unterjährige, also beispielsweise monatliche oder quartalsweise Verzinsung ist rechnerisch möglich, würde jedoch den Rechenaufwand zu Ungunsten der Übersichtlichkeit steigern. Des Weiteren würde es die unterjährige Verzinsung erforderlich machen, dass Zahlungsprognosen bezüglich ihres Berücksichtigungszeitpunktes noch genauer bestimmt werden müssten. Das Ergebnis würde eine Genauigkeit suggerieren, die faktisch nicht zu erzielen ist.

Weitere Annahmen betreffen die Vorgabe eines einheitlichen Kredit- bzw. Anlagezinssatzes sowie die Rahmenbedingungen, die einen vollkommenen Kapitalmarkt kennzeichnen. Beide Annahmen stimmen nicht mit der Realität überein. Die untergeordnete Relevanz des Anlagezinssatzes bei der Betrachtung von Infrastrukturbauwerken wurde bereits zuvor erörtert. Die Einflüsse, die zur Bestimmung eines geeigneten Kapitalzinssatzes führen, wurden schon in Abschnitt 4.4.5.4 aufgezeigt. Neben der Tatsache, dass bei einem vollkommenen Kapitalmarkt der Kredit- und der Anlagezinssatz identische Werte aufweisen, ist das zweite Merkmal des vollkommenen Kapitalmarktes, dass Kapital unbegrenzt aufgenommen und angelegt werden kann. Wie ebenfalls an früherer Stelle erörtert, besitzt die zweite Annahme im Rahmen der Finanzierung öffentlicher Infrastruktur einen untergeordneten Stellenwert. Finanzmittel werden aus dem Haushalt entnommen und ggf. ist eine Aufstockung des vorab bestimmten Finanzrahmens erforderlich. Grundsätzlich muss jedoch mit der Entscheidung, ein Projekt zu realisieren, auch in Betracht gezogen werden, dass eine Überschreitung der Soll-Kosten möglich wird. Anderenfalls könnte ein Projekt nicht fertiggestellt werden und es träte kein Nutzen ein. Dieser Gefahr, die außerhalb der monetären Bewertung angesiedelt ist, muss sich ein Investor von Projektbeginn an bewusst sein.

5.3 Die sukzessive Verknüpfung der Einzelprozesse in Modultabellen

5.3.1 Allgemeine Struktur des Berechnungsmodells

In diesem Abschnitt wird das Vorgehen aufgezeigt, die mit den Bauteilen eines Tunnelbauwerks assoziierten Kosten zu ermitteln und in die Lebenszykluskostenanalyse zu implementieren. Dazu werden die im vierten Kapitel eingehend erläuterten und teilweise mit Unsicherheiten behafteten Parameter sukzessive mit den Berechnungsansätzen verknüpft.

Zu Beginn ist zunächst der Zeithorizont festzulegen, über den die Lebenszykluskosten für ein Tunnelbauwerk analysiert werden sollen. Es ist davon auszugehen, dass der Betrachtungszeitraum für alle zu untersu-

chenden Bauwerksvarianten identisch lang ist und maßgeblich durch die Widerstandsfähigkeit der Rohbaustruktur geprägt wird. Aus bautechnologischer Sicht sind, wie auch in Tabelle 7 unter Verweis auf die Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung [32] aufgeführt, Nutzungsdauern von 130 Jahren bei einer geschlossenen und 90 Jahren bei einer offenen Tunnelbauweise zu wählen. Im Gegensatz dazu wird ein Konzessionsnehmer, der im Rahmen eines ÖPP-Vorhabens eine vertragliche Vereinbarung zur Planung, zum Bau und zum Betrieb eines Straßentunnels mit der Öffentlichen Hand eingeht, den Analysezeitraum exakt an die Vertragslaufzeit anpassen.

Anschließend erfolgt die Konfiguration des Tunnelbauwerks, d.h. alle Rohbau- und Betriebsausstattungs-komponenten, die den regelwerkskonformen und sicheren Betrieb des Tunnels garantieren, müssen festgelegt und in sogenannte Modultabellen übernommen werden. Jede Modultabelle umfasst, wie in der Abbildung 46 gezeigt, einen abgegrenzten Leistungsumfang, der keine funktionalen Überschneidungen mit anderen Modultabellen aufweisen darf. Inhaltlich kann es sich dabei um ein Rohbauelement, ein technisches Bauteil, Projekterlöse oder auch um eine Planungsleistung handeln. Die Anzahl der Modultabellen ist nicht beschränkt und vornehmlich von der Konfiguration des betrachteten Tunnelbauwerks abhängig. Unterstützung bei der Ermittlung der Module für die Lebenszykluskostenanalyse bieten die Tabellen 17 und 18, in denen Bauteile der Rohbauphase bzw. der Feldebene enthalten sind. Mit der Aufstellung alternativer Lösungskonzepte kann es durchaus dazu kommen, dass die Anzahl der erforderlichen Modultabellen zwischen den einzelnen Varianten variiert. Dabei ist lediglich sicherzustellen, dass jede zu untersuchende Bauwerksvariante eine vollwertige Alternativlösung repräsentiert. Als vollwertig wird jede Variante bezeichnet, die alle an das Tunnelbauwerk gestellten Funktionen vollumfänglich erfüllt. Wird dieser Forderung nicht nachgekommen, so schließen sich Bauwerksvarianten gegenseitig aus und die Voraussetzungen, einen Variantenvergleich auf Basis der Lebenszykluskosten durchzuführen, sind nicht gegeben. Aus der erörterten Problematik erwächst die Forderung, dass die Konfiguration jeder einzelnen Bauwerksvariante vom Planungsingenieur ein hohes Maß an Sorgfalt erfordert.

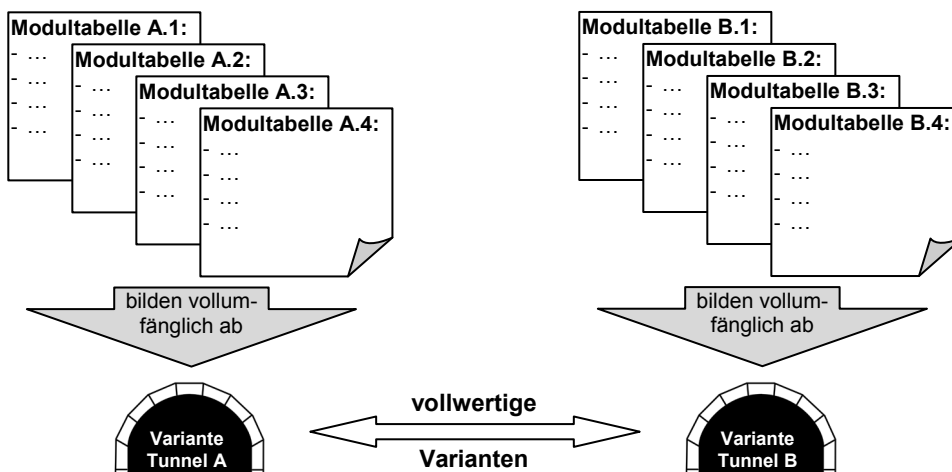


Abbildung 46: Aufbau der Modultabellen

In die Modultabellen müssen, wie in Abbildung 46 skizziert, sämtliche Daten einfließen, die für die Errechnung der gesamten Lebenszykluskosten eines Tunnelbauwerks erforderlich sind. Zum Umfang dieser Daten gehören theoretische Nutzungsdauern aller benötigten Bauteile und Komponenten sowie die damit im Zusammenhang stehenden Kosten. Voraussetzung für die Ermittlung der Kosten ist, dass ein eindeutiger Referenzzeitpunkt festgelegt wurde. Wie in Abschnitt 4.4.5.4 erläutert, fällt der Referenzzeitpunkt gewöhnlich mit der Inbetriebnahme des Bauwerks zusammen oder er markiert einen Wendepunkt für den Betrieb eines Bestandsbauwerks. Dieser Wendepunkt stellt für ein bestehendes Tunnelbauwerk den Zeitpunkt dar, ab

dem die Bewirtschaftung nach dem Lebenszykluskostenkonzept erfolgt. Die Einflüsse, unter denen die Modultabellen aufzustellen sind, gehen zusammenfassend aus Abbildung 47 hervor.

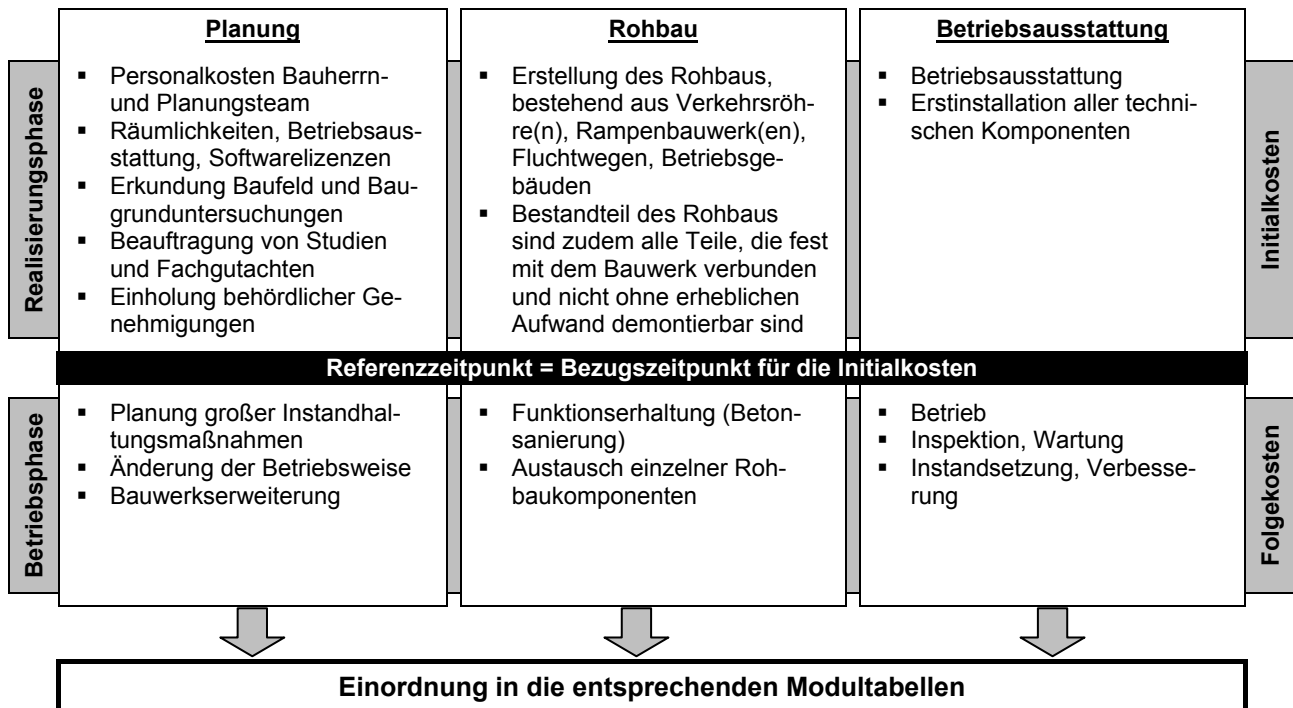


Abbildung 47: Durch die Modultabellen abzudeckender Umfang

5.3.2 Erfassung der Bauwerks- und Komponentenparameter in Modultabellen

Die verschiedenen Parameter, die in eine Modultabelle eingehen, sollen im Folgenden für eine beliebige Komponente j schrittweise erörtert werden. Neben Erläuterungen werden auch ggf. erforderliche Berechnungsschritte aufgezeigt, die für die Bestimmung einzelner Eingangsparameter benötigt werden. Der Übersicht halber fassen die Tabelle 24 sowie die Abbildung 49 sämtliche der im nachstehenden Text genannten Parameter sowie den methodischen Aufbau einer Modultabelle zusammen.

In einer übergeordneten Modultabelle sind zunächst elementare Angaben zum Tunnelbauwerk zu verankern. Hierzu zählt der zeitliche Horizont d [a], über den die Lebenszykluskosten für einen Tunnel analysiert werden sollen. Der Beginn des Analysezeitraums entspricht dem Jahr „0“, welches durch die Angabe einer konkreten Jahreszahl präzisiert wird. Im Weiteren sind die kostenverursachenden Elemente zusammenzustellen. Bei diesen Elementen handelt es sich beispielsweise um eindeutig abzugrenzende Rohbauabschnitte, Bauteile, technische Komponenten oder sonstige Einheiten, die mit monetär erfassbaren Leistungen in Verbindung stehen. Als Synonym für ein derartiges Element wird im Folgenden der Begriff „Komponente“ verwendet. Die Anzahl der unterschiedlichen Komponenten, die die vollumfängliche Konfiguration des Tunnelbauwerks wiedergeben, werden durch die Variable n [-] ausgedrückt. Die Anzahl n entspricht genau der erforderlichen Anzahl an Modultabellen. In jeder Modultabelle ist ferner anzugeben, in welcher Anzahl a_j [-] baugleich errichtete Komponenten zur Anwendung kommen und welcher Wert für die theoretische Nutzungsdauer s_j [a] einer spezifischen Komponente j zugrunde zu legen ist. Aus der theoretischen Nutzungsdauer s_j sowie der Dauer des Analysezeitraums d lässt sich die Anzahl der erforderlichen Austauschvorgänge q_j [-] ermitteln. In Abbildung 48 sind die zuvor aufgeführten, komponentenspezifischen Angaben zum besseren Verständnis in eine Grafik integriert und in den Kontext der Lebenszykluskostenanalyse eingeordnet.

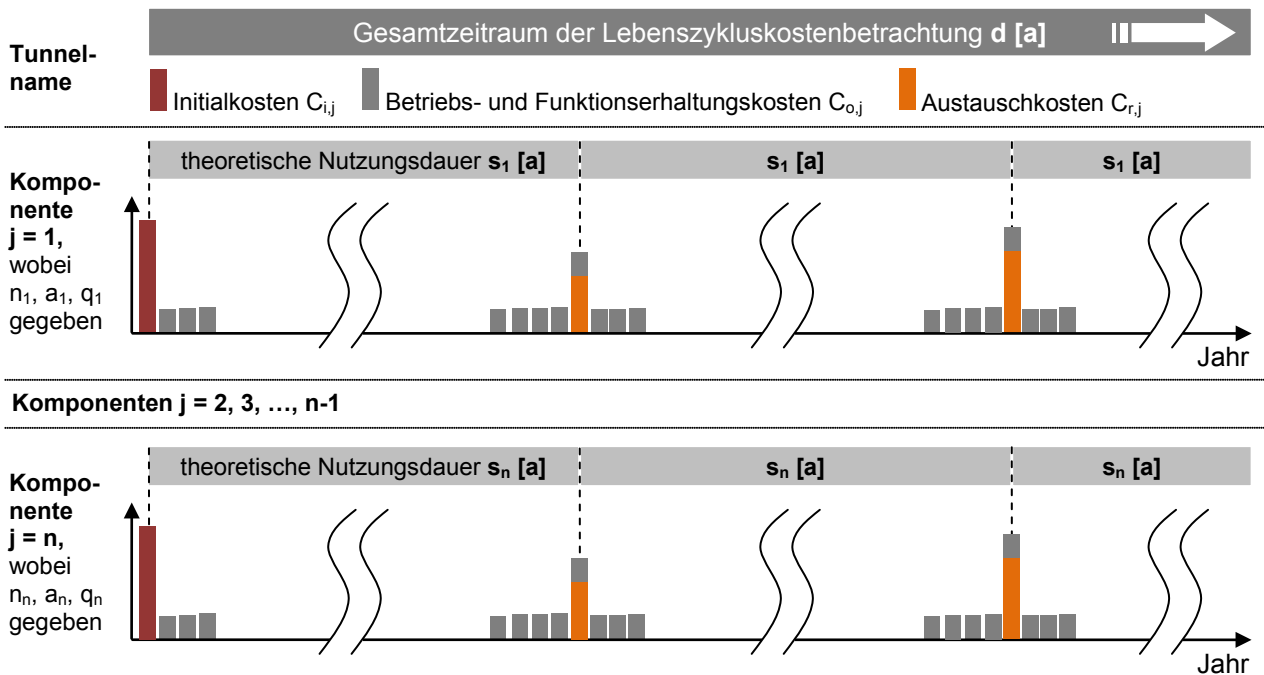


Abbildung 48: Grafische Darstellung der Variablen j , d , a_j , s_j und q_j

Die auch in Abbildung 48 mit Beginn der Komponentennutzungsdauer aufgetragenen Initialkosten $C_{i,j}$ umfassen die Ausgaben, die für die betriebsbereite Herstellung oder Beschaffung der Komponenten j zum gewählten Referenzzeitpunkt aufzuwenden sind. Je nach Stand der Planungsphase ist es erforderlich, die Initialkosten mit einem Faktor $w_j [-]$ zu beaufschlagen. Der Faktor w_j drückt die Unsicherheit bzw. Schwankungsbreite aus, die der Bestimmung der Initialkosten für die Komponente j in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Lebenszykluskostenbetrachtung innewohnt. Liegen keine verlässlichen Daten zur Abschätzung der Schwankungsbreite vor, so kann die Größenordnung des Faktors w_j aus der in Abbildung 31 dargestellten Verlaufsgrafik in Kombination mit den Werten der Tabelle 19 entnommen werden. Die Bandbreite der Initialkosten wird somit durch drei charakteristische Stützstellen vorgegeben:

- Den Charakter eines Mittelwertes, mit dem mutmaßlich die größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist, drücken die Kosten $C_{i,j}$ aus,
- Das ungünstigste Szenario ist den Initialkosten der Höhe $(1 + w_j) * C_{i,j}$ zugeordnet,
- Das vermeintlich vorteilhafteste Szenario wird durch die Initialkosten $(1 - w_j) * C_{i,j}$ repräsentiert.

Ein sachkundiger und versierter Kalkulator ist in die Lage, den Faktor w_j zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten abweichend von der in der Tabelle 19 angegebenen Schwankungsbreite einzuschätzen. Anhand eines einfachen Beispiels soll diese These verdeutlicht werden: In einer frühen Planungsphase ist die prozentuale Schwankungsbreite für die Kosten zur Herstellung der Rohbaustruktur eines Tunnels aufgrund einer nur überschläglich erfolgten statischen Dimensionierung bezüglich der endgültigen Abrechnungssumme aller Voraussicht nach größer als die Kostenschwankungsbreite für ein technisches Bauteil, welches durch einen Spezialhersteller in Serienproduktion gefertigt wird. Aus dem Beispiel wird ersichtlich, dass der Anwendungsbereich der in Abbildung 31 aufgetragenen Schwankungsbreite hauptsächlich die Planung von Rohbauleistungen betrifft, für technische Komponenten und Einbauteile aber durchaus andere Beurteilungsmaßstäbe zur Festlegung der Größe w_j heranzuziehen sind.

Mit Bezugnahme auf die zuvor erläuterten Initialkosten wenden sich die nachstehenden Überlegungen den Folgekosten zu. Im Zuge der Modellierung der Lebenszykluskosten setzen sich die Folgekosten grundsätzlich aus zwei Anteilen zusammen: Der erste Anteil umfasst die Kosten, die jährlich für den Betrieb und die Funktionserhaltung der Komponente j aufzuwenden sind, dem zweiten Anteil werden die Kosten zugerech-

net, die nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer infolge des Austausches der Komponente j kalkulatorisch zu erfassen sind. Die beiden Folgekostenanteile lassen sich wie folgt aus den Initialkosten $C_{i,j}$, die dem Preisstand zum Referenzzeitpunkt widerspiegeln, berechnen:

- Der erste Folgekostenanteil bezieht den Betrieb und die Funktionserhaltung der Komponente j bzgl. des Referenzzeitpunktes ein: $C_{o,j} = p_{o,j} * C_{i,j}$ bzw. $C_{o,j} = p_{o,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$.

Der Faktor $p_{o,j}$ [-] ist ein Maß für den jährlichen Anteil an den Betriebs- und Erhaltungskosten in Bezug auf die Initialkosten für die Komponente j .

- Der zweite Folgekostenanteil beschreibt bzgl. des Referenzzeitpunktes die Austauschkosten, die wiederkehrend nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer s_j [a] für die Komponente j aufzuwenden sind:

$$C_{r,j} = e_{k,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{r,j} = e_{k,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}.$$

Der Faktor $e_{k,j}$ [-] repräsentiert den Austauschgrad, der optional individuell für jeden erforderlichen Komponentenaustausch vorgegeben oder pauschal auf $e_{k,j} = 1,0$ festzusetzen ist. Ein Wert für den Austauschgrad $e_{k,j} \neq 1,0$ drückt aus, dass der Umfang des Austauschs nicht mit dem der Erstinstallation übereinstimmt; dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn vorhandene Hilfsbauteile wie Strom- oder Datenkabel ihre theoretische Nutzungsdauer noch nicht erreicht haben und weiter genutzt werden können. Auch größere Sanierungsarbeiten an der Rohbaustruktur lassen sich mit Hilfe der Austauschkosten abbilden. Hierfür sind entsprechende Faktoren $e_{k,j}$ zu wählen.

Der erste Folgekostenanteil für den Betrieb und die Funktionserhaltung einer Komponente lässt sich entweder pauschal durch den Faktor $p_{o,j}$ beschreiben oder optional weiter in die Anteile für Energie $p_{e,j}$ [-] und Instandhaltung $p_{m,j}$ [-] untergliedern. Insbesondere dann, wenn der Betrieb einer Komponente mit einer hohen Leistungsaufnahme und demzufolge mit einem hohen Stromverbrauch einhergeht, sollten die Energiekosten – da sie in der Regel eine andere Preisentwicklung aufweisen – von der Preisentwicklung der Instandhaltungskosten abgekoppelt werden. Für diesen Fall muss die Summe der Einzelfaktoren für Energie $p_{e,j}$ und Instandhaltung $p_{m,j}$ den Wert des Faktors $p_{o,j}$ annehmen. Es gilt also: $p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}$.

Eine darüber hinaus gehende Faktorisierung kann für die Untergliederung von Instandhaltungsaufwendungen vorgenommen werden: Diese Option sollte dann zur Anwendung kommen, wenn die Zunahme von Instandhaltungskosten im Zeitraum zwischen der Inbetriebnahme und der Außerbetriebnahme einer Komponente gesondert hervorgehoben werden soll. Dabei spiegelt der Faktor $p_{m,j}$ den anfänglichen Instandhaltungsaufwand, die Faktorensomme $p_{m,j} + g_{m,j}$ den Instandhaltungsaufwand unmittelbar vor dem theoretischen Austauschzeitpunkt der Komponente wider. Dieser Überlegung liegt die Annahme zugrunde, dass im Zeitraum zwischen der Inbetriebnahme und dem Austausch einer Komponente der Instandhaltungsaufwand durch vermehrte Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen mutmaßlich linear zunimmt. Der Faktor zur Abbildung der Instandhaltungsaufwendungen muss somit als zeitabhängige Variable ausgedrückt werden:

$$p_{m,j}(t) = p_{m,j}(t_0) + \frac{g_{m,j}}{s_j} * t, \text{ wobei } t \in [0; s_j] \quad (\text{Formel 5.1})$$

In Formel 5.1 stellt der Quotient aus $g_{m,j}$ und s_j die Steigung der Geraden dar; die Steigung ist ein Maß für die Zunahme von Instandhaltungsaufwendungen über die theoretische Nutzungsdauer.

	Variable	Beschreibung	Herkunft Variable/Index
Eigenschaften Bauwerk/ Komponente	d [a]	Zeithorizont, über den die Lebenszykluskosten des Tunnels analysiert werden, wobei $d \in \mathbb{N}$	<u>d</u> uration
	n [-]	Gesamtanzahl unterschiedlicher, kostenverursachender Komponenten, die die Konfiguration des Tunnelbauwerks vollumfänglich wiedergeben, wobei $n \in \mathbb{N}$	<u>n</u> umber
	a _j [-]	Anzahl baugleich errichteter Komponenten j, wobei $a_j \in \mathbb{N}$	<u>a</u> mount
	s _j [a]	theoretische Nutzungsdauer der Komponente j, wobei $s_j \in \mathbb{N}$	<u>s</u> ervice life
	q _j [-]	Anzahl der insgesamt erforderlichen Austauschvorgänge inkl. der Erstinstallation für die Komponente j: $q_j = \left\lceil \frac{d}{s_j} \right\rceil$ ($\lceil \dots \rceil \rightarrow$ der Term in der Klammer ist auf die nächste natürliche Zahl aufzurunden, wobei $q_j \in \mathbb{N}$)	<u>q</u> uantity
Initialkosten	C _{i,j} [GE]	Initialkosten zur betriebsbereiten Herstellung oder Beschaffung für eine Einheit der Komponente j auf Preisbasis des Referenzzeitpunktes; den Initialkosten ist die Kennziffer k = 0 zugeordnet (zur Bedeutung der Kennziffer k wird auf die in der letzten Tabellenzeile aufgeführten Erläuterung zur Variable e _{k,j} verwiesen)	<u>i</u> nitial <u>c</u> osts
	w _j [-]	Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten für die Komponente j in Abhängigkeit vom Status der Planungsphase	<u>w</u> idth
Folgekosten	C _{o,j} [GE/a]	Kosten, die jährlich für den Betrieb und die Funktionserhaltung der Komponente j aufzuwenden sind	<u>o</u> perational <u>c</u> osts
	p _{o,j} [-]	Faktor zur Ermittlung des jährlichen Anteils für Betrieb und Erhaltung bzgl. der Initialkosten für die Komponente j: $C_{o,j} = p_{o,j} * C_{i,j}$	<u>p</u> ercentage <u>o</u> peration
	p _{e,j} [-] p _{m,j} [-]	Optionale Aufteilung des Faktors für Betrieb und Erhaltung: Faktor zur Berücksichtigung der Energiekosten Faktor zur Berücksichtigung der Instandhaltungskosten $C_{o,j} = (p_{e,j} + p_{m,j}) * C_{i,j}$, wobei $p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}$	<u>p</u> ercentage - <u>e</u> nergy - <u>m</u> aintenance
	g _{m,j} [-]	Optionale Zunahme der Instandhaltungskosten durch steigendes Alter der Komponente j für $a_j \geq 2$ Jahre: Faktor zur Festlegung des Steigungsmaßes $p_{m,j}(t) = p_{m,j}(t=0) + \frac{g_{m,j}}{s_j} * t$, wobei $t \in [0; s_j]$	<u>g</u> rowth <u>m</u> aintenance
	C _{r,j} [GE/a]	Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer s _j	<u>r</u> eplacement <u>c</u> osts
	e _{k,j} [-]	Austauschgrad, der entweder pauschal 1,0 beträgt oder optional für jeden Komponentenaustausch individuell in Abhängigkeit von der Kennziffer k anzugeben ist. Für die Kennziffer k gilt: $k = \{1, 2, \dots, q_j - 1\}$, wobei k = 1 den ersten Austausch nach der Erstinstallation bezeichnet	<u>e</u> xchange <u>k</u> ey number

Tabelle 24: Zusammenfassung der zur Analyse der Lebenszykluskosten von Straßentunnelbauwerken benötigten Variablen

Mit Ausnahme der Variablen, die in Tabelle 24 als optional gekennzeichnet sind, müssen für eine Lebenszykluskostenanalyse alle übrigen Informationen zur Eingabe in die entsprechenden Modultabellen zur Verfügung stehen. Das in Abbildung 49 gezeigte Flussdiagramm lässt erkennen, welche Schritte bei einer Lebenszykluskostenanalyse zu durchlaufen und wie die zuvor erläuterten Variablen miteinander verknüpft sind.

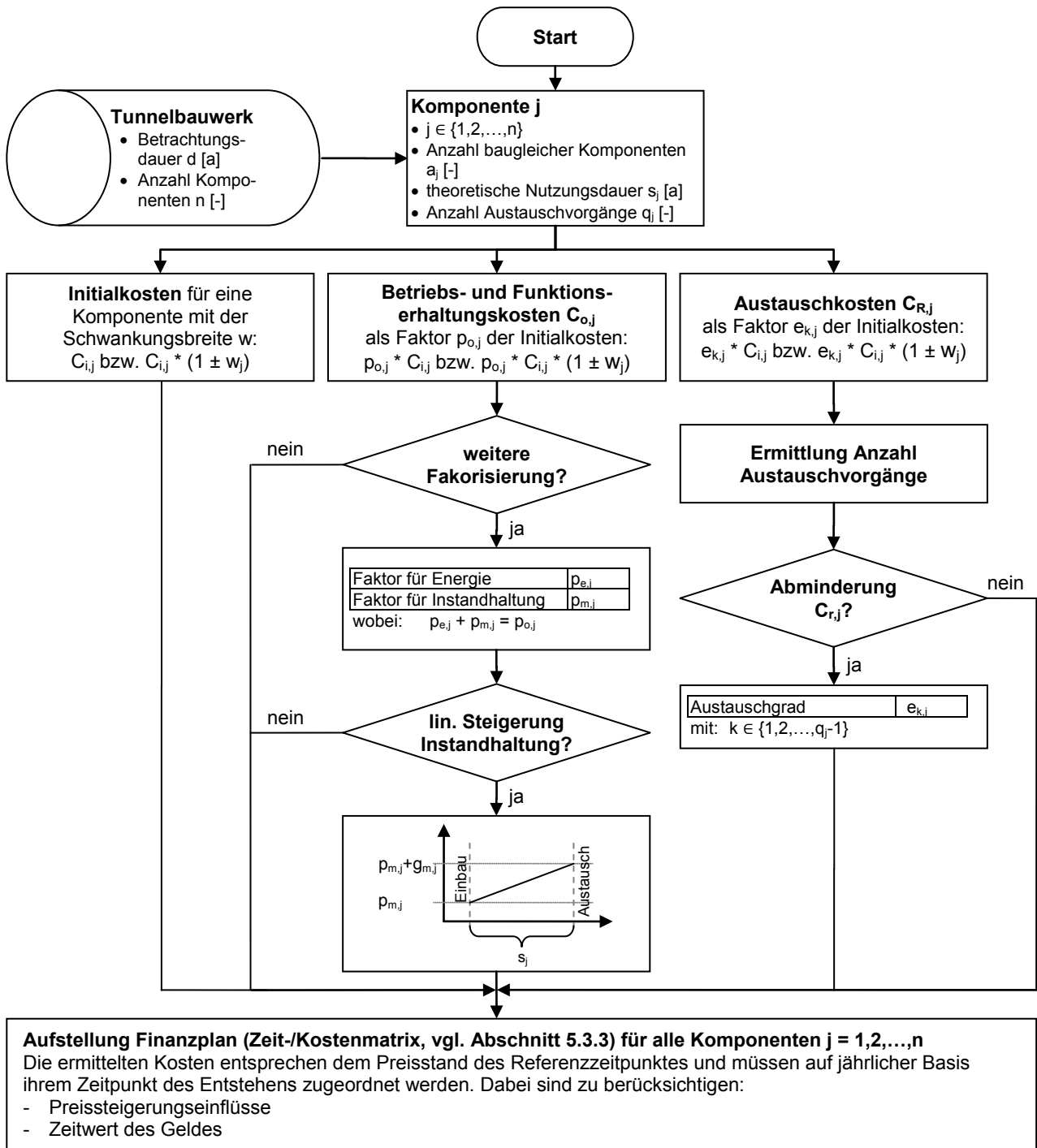


Abbildung 49: Die systematische Verknüpfung der Variablen

Aus Abbildung 49 wird ersichtlich, welchen Stellenwert der Betrag der Initialkosten $C_{i,j}$ für die weitere Lebenszykluskostenanalyse hat: Sowohl die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten $C_{o,j}$ als auch die Austauschkosten $C_{r,j}$ werden unter Zuhilfenahme entsprechender Faktoren auf die Initialkosten zurückgeführt. Mit Übertragung der Initial- auf die Folgekosten werden auch die den Initialkosten zugeordneten Schwankungsbreiten w_j fortgeschrieben. Dies bedeutet, dass mit einer sukzessiv voranschreitenden Planung nicht nur die Prognoseunsicherheit bezüglich der Initialkosten, sondern auch im Hinblick auf die Folgekosten abnimmt. Daraus lässt sich das Resümee ableiten, dass eine Konkretisierung der Dimensionierung von Bauwerk und technischer Ausstattung synchron auch dazu führt, das mit den Initial- und Folgekosten verbundene Unsicherheitsspektrum weiter einzugrenzen.

Die Initialkosten $C_{i,j}$ und die beiden Folgekostenanteile $C_{o,j}$ und $C_{r,j}$ geben nominale Kosten wieder, die sich ausschließlich auf den gewählten Referenzzeitpunkt beziehen. Wie im unteren Teil der Abbildung 49 gezeigt, werden die ermittelten Kostenanteile unter Berücksichtigung der Preisentwicklung sowie des Zeitwerts des Geldes ihren konkreten Entstehungszeitpunkten zugeordnet. Die Zuordnung der Kosten zu einer nominalen Zeit-/Kostenmatrix wird in Abschnitt 5.3.3 behandelt, die zeitabhängige Preisentwicklung sowie die Diskontierung sind hingegen Inhalt von Abschnitt 5.3.4.

5.3.3 Die Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix

Für sämtliche Modultabellen, die Angaben zu Initial- und Folgekosten einzelner Komponenten enthalten, sind im Verlauf der Lebenszykluskostenanalyse zwei Arten von Zeit-/Kostenmatrizen zu errechnen. Zum einen handelt es sich dabei um die nominale Zeit-/Kostenmatrix, zum anderen um die abschließende Ergebnismatrix. Die letztgenannte Matrix beinhaltet die realen sowie die auf den Referenzzeitpunkt bezogenen bzw. abgezinsten Barwerte.

Zunächst – und dieses Vorgehen steht in Einklang mit der chronologisch zu beschreitenden Arbeitsabfolge – soll die Berechnung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix erläutert werden. Die Grundlage zur Aufstellung dieser Zeit-/Kostenmatrix bildet das in Abbildung 49 dargestellte Flussdiagramm: Dabei werden die nominalen Kostenanteile für jede einzelne Komponente ihrem eigentlichen Entstehungsjahr zugeordnet. Das Jahr „Null“ entspricht dem Jahr, in dem die Lebenszykluskostenbetrachtung für das Tunnelbauwerk beginnt. Für ein Neubauprojekt entspricht das Jahr „Null“ in der Regel dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme, für ein Bestandsprojekt fällt das Jahr „Null“ mit dem Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme eines Tunnels zusammen. Voraussetzung zur Anwendung der Systematik auf Bestandsbauwerke ist aber, dass zuvor ein Wechsel zugunsten der Lebenszyklusphilosophie eingeleitet wurde. Im Weiteren wird durch die Vorgabe eines konkreten Kalenderjahres das Jahr „Null“ genau definiert. Unter Ansatz der gesamten Lebenszyklusdauer d ist sodann für das Tunnelbauwerk das entsprechende Kalenderjahr zu ermitteln, mit dessen Jahresabschluss die Betrachtung vorläufig enden soll.

Wie in Abschnitt 3.5.3 erläutert, geht die Anwendung der Kapitalwertmethode damit einher, dass zum Ende eines jeden Jahres sämtliche Zahlungen nachschüssig verzinst werden. Die Wahl von Jahresintervallen wird, wie ebenfalls an früherer Stelle diskutiert, als hinreichend genau angesehen. Aus den vorherigen Ausführungen resultiert die Konsequenz, dass dem Jahr „Null“ nur Initial- und keine Folgekosten zuzuordnen sind. Da es sich bei der theoretischen Nutzungsdauer s_j einer Komponente j um einen Wert handelt, der durch eine natürliche Zahl ausgedrückt wird, fällt der rechnerische Austauschzeitpunkt für eine Komponente folglich auch immer auf ein Jahresende. Zusammenfassend ist somit eine logische und gut einzuprägende Systematik für die Zuordnung der Kosten in die Zeit-/Kostenmatrix geschaffen. Im Einzelnen umfasst die Erstellung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix die folgenden Schritte:

- Dem Jahr, in dem eine Komponente erstmalig im Tunnel installiert wird, sind nur die Initialkosten zugeordnet. In den überwiegenden Fällen werden die Initialkosten im Jahr „Null“ angesetzt. Ist jedoch schon zum Betrachtungszeitpunkt absehbar, dass eine Komponente erst zu einem späteren Zeitpunkt für den sicheren Betrieb eines Tunnels notwendig wird, so sind die Initialkosten erst zum Ende des entsprechenden Jahres einzuplanen. Unabhängig davon, zu welchem Zeitpunkt die Initialkosten Berücksichtigung finden, entsprechen alle Initialkosten dem Preisstand des Referenzzeitpunktes. Somit ist sichergestellt, dass für alle Komponenten ein einheitlicher Preisstand gilt.
- Erstmals im Folgejahr nach Ansatz der Initialkosten gehen die Folgekosten für eine Komponente in die Zeit-/Kostenmatrix ein. Diese werden solange wiederkehrend zum Ende eines Jahres fortgeschrieben, bis der zeitliche Horizont der Lebenszykluskostenanalyse erreicht wird.

- Die Folgekosten bestehen sowohl aus den Betriebs- und Funktionserhaltungskosten, als auch aus den Austauschkosten, die durch die Ersatzbeschaffung einer Komponente hervorgerufen werden. Die Betriebs- und die Funktionserhaltungskosten einerseits, aber auch die Austauschkosten andererseits können durch eine weitergehende Faktorisierung optional weiter untergliedert werden.

Im Folgenden werden die mathematischen Berechnungsformeln angeführt, mit deren Hilfe eine vollständige nominale Zeit-/Kostenmatrix unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten zu entwickeln ist. Zentrale Bedeutung bei der Ermittlung der Folgekosten nehmen dabei die Initialkosten $C_{i,j}$ für die Komponente j bezüglich des Referenzzeitpunktes (s. Abschnitt 5.3.4) an. Unter der Voraussetzung, dass die Initialkosten einer Komponente j zum Zeitpunkt $t_{in,j}$ erstmalig in die nominale Zeit-/Kostenmatrix einfließen, ergeben sich die nachfolgend aufgeführten Zusammenhänge. Die Berechnung der Initialkosten wird dabei unter dem Gliederungspunkt „I.0“ subsumiert, die Folgekosten ergeben sich aus den Anteilen für Betriebs- und Funktionserhaltung (F.1) und den Anteilen für den Komponentenaustausch (F.2). Die mit den Zusätzen a, b oder c versehenen Gliederungspunkte stellen optionale Berechnungswege dar. Während der Buchstabe a den Charakter einer überschlägigen Berechnung ausdrückt, weist der Buchstabenzusatz c darauf hin, dass ein höherer Detaillierungsgrad bzgl. der in die Berechnung eingehenden Größen gefordert wird. Das dem Gliederungspunkt in Klammern nachgestellte „n“ weist darauf hin, dass es sich um nominale Werte handelt.

I.0(n) Initialkosten für die erstmalige Installation der Komponente j :

$$\text{für } t = t_{in,j}: C_{i,j} \text{ bzw. } (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1a(n) Jährlich wiederkehrende Betriebs- und Funktionserhaltungskosten:

$$\text{für } t > t_{in,j}: C_{o,j} = p_{o,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{o,j} = p_{o,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1b(n) Optionale Betriebs- und Funktionserhaltungskosten unter Ansatz einer separaten Faktorisierung der Energie- und Instandhaltungsaufwendungen:

$$\text{für } t > t_{in,j}: C_{o,j} = (p_{e,j} + p_{m,j}) * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{o,j} = (p_{e,j} + p_{m,j}) * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1c(n) Wie unter F.1b(n) beschrieben; jedoch besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Instandhaltungsaufwand zwischen der Inbetrieb- bzw. der Wiederinbetriebnahme und dem Funktionsausfall bzw. der Außerbetriebnahme für die Komponente j eine lineare Steigung vorzusehen:

$$\text{für } t_{in,j} + k * s_j \leq t \leq t_{in,j} + (k + 1) * s_j:$$

$$C_{o,j}(t) = \left(p_{e,j} + p_{m,j} + g_{m,j} * \frac{t + s_j - [(k+1) * s_j + t_{in,j}]}{s_j} \right) * C_{i,j} \quad (\text{Formel 5.2})$$

bzw.

$$C_{o,j}(t) = \left(p_{e,j} + p_{m,j} + g_{m,j} * \frac{t + s_j - [(k+1) * s_j + t_{in,j}]}{s_j} \right) * C_{i,j} * (1 \pm w_j) \quad (\text{Formel 5.3})$$

wobei $k = \{1, 2, \dots, q_{j-1}\}$

Die Kennzahl $k = 1$ bezeichnet den ersten Austausch nach der Erstinstallation

F.2a(n) Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer. Die Austauschkosten leiten sich aus den Initialkosten ab:

$$\text{für } t = t_{in,j} + k * s_j: C_{r,j} = C_{i,j} \text{ bzw. } C_{r,j} = (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.2b(n) Optionale Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer, wobei für jeden Austauschvorgang der Austauschgrad $e_{k,j}$ [-], welcher direkt von den Initialkosten abhängt, anzugeben ist:

$$\text{für } t = t_{in,j} + k * s_j: C_{r,j} = e_{k,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{r,j} = e_{k,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

Neben den Ausgaben sind bei der Aufstellung der Zeit-/Kostenmatrix ggf. Einnahmen zu berücksichtigen, die mit dem Betrieb des Bauwerks generiert werden. Erfolgt der Betrieb eines Straßentunnels durch die öffentliche Hand, so stehen den Kosten in der Regel keine Erlöse gegenüber, im Falle eines ÖPP-Tunnelprojektes ist die Erzielung von Erlösen wichtiger Bestandteil der Kalkulation um die Gesamtwirtschaftlichkeit zu erreichen. Da es sich auch bei den Erlösen um nominale Werte handelt, sind diese ebenfalls mit Preisstand zum Referenzzeitpunkt in die Matrix zu implementieren. Die Ansätze zur Ermittlung der Erlöse bei ÖPP-Vorhaben können dabei auf unterschiedlichen Ansätzen beruhen: Handelt es sich nach Weber und Alfen [167] um ein Brownfield-Projekt, d.h. ein Tunnelstreckenabschnitt ist bereits Teil des bestehenden Streckennetzes zu dem Zeitpunkt, zu dem die Umwandlung in ein ÖPP-Projekte beschlossen wird, so kann die Abschätzung der Erlöse aus Maut- oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen auf Grundlage der Betriebshistorie abgeleitet werden. Ist das Projekt hingegen nach der bei Weber und Alfen [167] gegebenen Definition ein Greenfield-Projekt und hat den Stellenwert der Erschließung einer neuen Verkehrsrouten, so liegen für dieses ÖPP-Vorhaben lediglich Verkehrsprognosen vor, auf denen sich die Abschätzung der Erlöse stützen muss. Wie in Abschnitt 4.4.4 erwähnt, kann eine einschränkende Verfügbarkeit dazu führen, dass die Erlöse nach im ÖPP-Vertrag definierten Vorgaben reduziert werden müssen. Gleichwohl ist auch der Fall zu kalkulieren, dass das Verkehrsvolumen innerhalb der Betrachtungsdauer zunimmt und somit die Erlöse steigen. Die Variable G bzw. der Index g stehen für den erzielbaren Erlös und wurde aus dem Englischen vom Wortstamm „gains“ abgeleitet. Um eine eindeutige Kennzeichnung zu gewährleisten sind die Erlöse mit einem positiven Vorzeichen zu versehen. Wie bei den Kosten bezieht sich der vorzugebene Wert G ebenfalls auf den Referenzzeitpunkt der gesamten Lebenszykluskostenbetrachtung. Die ggf. in das Berechnungsmodell zu implementierenden Erlöse stellen sich wie folgt dar:

E.1a(n) Jährliche wiederkehrende Erlöse aus Maut oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite w^g [-]:

$$\text{für } 0 < t \leq d: G \text{ bzw. } (1 \pm w^g) * G$$

E.1b(n) Erlöse aus Maut oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen, wobei die Erlöse optional in Abhängigkeit der prognostizierten Einflüsse einer separaten Faktorisierung unterliegen können:

$$\text{für } 0 < t \leq d: e^g(t) * G \text{ bzw. } e^g(t) * (1 \pm w^g) * G$$

wobei der Faktor $e^g(t)$ [-] den für jedes Betriebsjahr zu definierenden Erlösfaktor beschreibt

Die Systematik, Kosten und Erlöse konsequent in eine nominale Zeit-/Kostenmatrix einzubinden, soll im Folgenden näher betrachtet werden. Eine Zeit-/Kostenmatrix bzw. eine zu untersuchende Tunnelvariante sind als vollständig anzusehen, wenn alle relevanten Angaben identifiziert und in die entsprechenden Modultabellen aufgenommen wurden. Ein wirtschaftlicher Vergleich zwischen verschiedenen Tunnelvarianten ist indes erst dann möglich, sobald für sämtliche zu untersuchende Varianten eine vollständige Erfassung in den Modultabellen abgeschlossen wurde. Exemplarisch sollen, wie in Tabelle 25 aufgeführt, drei Komponenten über die Lebenszykluskostendauer d des Bauwerks betrachtet werden. Im Einzelnen zeichnen sich die Komponenten $j = 1, 2, 3$ durch die folgenden Randbedingungen aus:

Komponente $j = 1$:

- Sowohl für die Initial- als auch für die Folgekosten ist die einheitliche Schwankungsbreite w_1 [-] zu berücksichtigen,
- Mit Inbetriebnahme des Tunnels erfolgt die Berücksichtigung der Initialkosten für die Komponente, es gilt also $t_{n,1} = 0$,
- Die Anzahl der baugleich errichteten Komponenten beträgt a_1 [-],
- Die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten sind gemäß dem Gliederungspunkt F.1b(n) zu ermitteln,
- Die theoretische Nutzungsdauer beträgt $s_1 = 10$ a; die Anrechnung der Austauschkosten erfolgt gemäß Punkt F.2b(n).

Komponente j = 2:

- Sowohl für die Initial- als auch für die Folgekosten ist die einheitliche Schwankungsbreite w_2 [-] zu berücksichtigen,
- Die Initialkosten der Komponente werden zum Ende des zweiten Betriebsjahres angesetzt, es gilt also $t_{ln,2} = 2$,
- Die Anzahl der baugleich errichteten Komponenten beträgt a_2 [-],
- Die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten sind gemäß dem Gliederungspunkt F.1c(n) zu ermitteln,
- Die theoretische Nutzungsdauer beträgt $s_2 = 8$ a; die Anrechnung der Austauschkosten erfolgt gemäß Punkt F.2a(n).

Komponente j = 3:

- Diese Komponente beschreibt ausschließlich die Erlöse, die durch den Betrieb des Tunnelbauwerks erzielt werden; der Faktor a_3 hat somit den Wert 1,
- Erlöse gehen ab dem ersten Betriebsjahr in die Zeit-/Kostenmatrix ein,
- Die Erlöse werden mit der Schwankungsbreite w^g [-] beaufschlagt und der Erlösfaktor $e^g(t)$ [-] findet in Übereinstimmung mit dem Gliederungspunkt E.1b(n) Anwendung.

Für die in der letzten Zeile der Tabelle 25 aufgeführte Komponente $j = n$ gelten dieselben Bedingungen wie für die Komponente $j = 1$.

Die Erlöse der Komponente $j = 3$ zeichnen sich durch ein positives Vorzeichen aus. Folgerichtig müssen die Kosten, wie in Tabelle 25 für die Komponenten $j = 1, 2, \dots, n$ gezeigt mit einem negativen Vorzeichen versehen werden.

		Zeitpunkt t [a]						
		0	1	2	...	10	...	d
Komponente j	1	$- C_{i,1} * (1 \pm w_1) * a_1$	$-(p_{e,1} + p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1$	$-(p_{e,1} + p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1$	...	$[- (p_{e,1} + p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} - e_{1,1} * (1 \pm w_1) * C_{i,1}] * a_1$	...	$-(p_{e,1} + p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1$
	2			$- C_{i,2} * (1 \pm w_2) * a_2$	...	$[- [p_{e,2} + p_{m,2} + g_{m,2} * [t + s_j - ((k + 1) * s_j + t_{ln,2})] / s_2] * (1 \pm w_2) * C_{i,2} - C_{i,2} * (1 \pm w_2)] * a_2$	...	$- C_{i,2} * (1 \pm w_2) * a_2$
	3		$e^g(t_1) * (1 \pm w^g) * G$	$e^g(t_2) * (1 \pm w^g) * G$	...	$e^g(t_{10}) * (1 \pm w^g) * G$	...	$e^g(t_d) * (1 \pm w^g) * G$

	n	$- C_{i,n} * (1 \pm w_n) * a_n$	$-(p_{e,n} + p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n$	$-(p_{e,n} + p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n$	...	$[- (p_{e,n} + p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} - e_{1,n} * (1 \pm w_n) * C_{i,n}] * a_n$	...	$-(p_{e,n} + p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n$

Tabelle 25: Nominale Zeit-/Kostenmatrix

Mit der Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix ist ein wichtiger Schritt zur Berechnung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken vollzogen worden. Dabei kann in Abhängigkeit vom Umfang der vorliegenden Projekt- bzw. Komponenteinformationen gewählt werden, in welcher Detailschärfe mit den Folgekosten und den ggf. anfallenden Erlösen umzugehen ist. Die zuvor unter verschiedenen Gliederungspunkten erläuterten Berechnungsweisen sollen abschließend in Abbildung 50 im Hinblick auf ihre Kombinationsmöglichkeiten zusammengefasst werden.

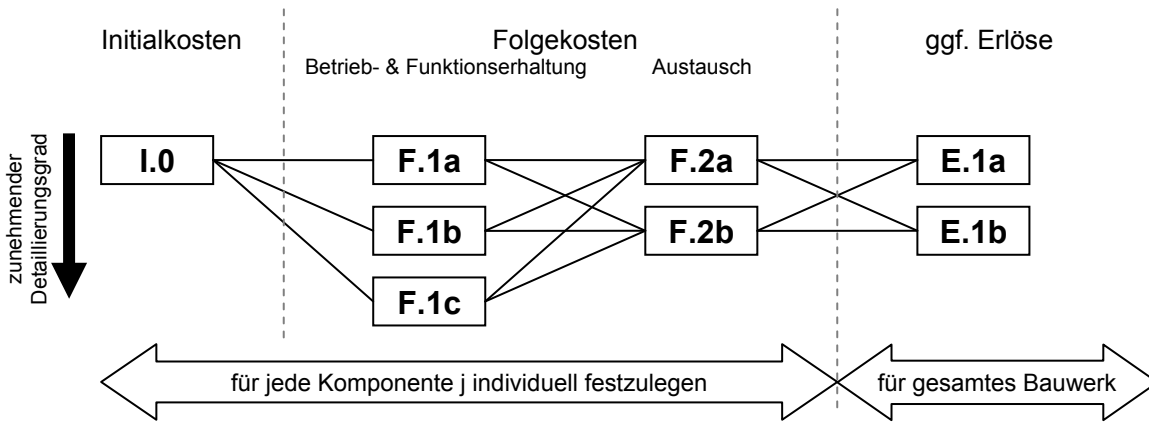


Abbildung 50: Möglichkeiten zur Kombination der Initial- und Folgekosten sowie der Erlöse

Auf Basis der entwickelten nominalen Zeit-/Kostenmatrix werden im folgenden Abschnitt 5.3.4 die zeitabhängige Preisentwicklung berücksichtigt sowie die auf den Referenzzeitpunkt abgezinsten Barwerte errechnet.

5.3.4 Berücksichtigung der Preisentwicklung und des Zeitwerts des Geldes

Die zuvor beschriebene, teilweise optionale Faktorisierung der Folgekosten ermöglicht einerseits – sofern entsprechende Daten vorliegen – den Detaillierungsgrad der Kostenermittlung zu erhöhen, andererseits wird eine entsprechende Grundlage dafür geschaffen, differenzierte Preisentwicklungseinflüsse über die Dauer des Lebenszyklus einer Komponente zu berücksichtigen. Der letztgenannte Faktor beinhaltet auch Einflüsse zur Preisanpassung findet unter Zuhilfenahme der in Abschnitt 4.4.5.3 aufgeführten Preisindizes Einzug in das Lebenszykluskostenmodell für Straßentunnelbauwerke. Da die Folgekosten unmittelbar auf die Initialkosten $C_{i,j}$ einer Komponente zum Referenzzeitpunkt zurückgreifen, müssen die Folgekosten zwingend als Funktion der Zeit ausgedrückt werden. Zur Berücksichtigung der Preissteigerung wird der zeitabhängige Preissteigerungsfaktor $PF_{x,y}(t)$ eingeführt. Die erste Indexvariable x zeigt an, für welchen Zweck der Preissteigerungsfaktor Verwendung findet, die zweite Variable y drückt den gewählten Preisindex nach Abbildung 45 aus. Die Indexvariable x variiert dabei zwischen i für die Initialkosten, o für die Kosten der Betriebs- und Funktionserhaltung, m für die Instandhaltungskosten, e für Energieaufwendungen, r für die Austauschkosten und g für die Erlöse. Für den Preissteigerungsfaktor $PF_{x,y}(t)$ werden die folgenden Festlegungen getroffen:

- $PF_{x,a}(t) = (1+pf_a/100)^t$: aus dem Verbraucherpreisindex anzunehmende Preissteigerung zwischen dem Referenzzeitpunkt und dem Zeitpunkt t für einen jährlichen Veränderungswert pf_a [%] nach Abbildung 45 (a)
- $PF_{x,b}(t) = (1+pf_b/100)^t$: die aus dem Preisindex für gewerbliche Produkte anzunehmende Preissteigerung zwischen dem Referenzzeitpunkt und dem Zeitpunkt t für einen jährlichen Veränderungswert pf_b [%] nach Abbildung 45 (b)
- $PF_{x,c}(t) = (1+pf_c/100)^t$: die aus dem Preisindex für Straßenbau anzunehmende Preissteigerung zwischen dem Referenzzeitpunkt und dem Zeitpunkt t für einen jährlichen Veränderungswert pf_c [%] nach Abbildung 45 (c)
- $PF_{x,d}(t) = (1+pf_d/100)^t$: die aus dem Preisindex für Brücken im Straßenbau anzunehmende Preissteigerung zwischen dem Referenzzeitpunkt und dem Zeitpunkt t für einen jährlichen Veränderungswert pf_d [%] nach Abbildung 45 (d)
- $PF_{x,e}(t) = (1+pf_e/100)^t$: die aus dem Preisindex für Maschinenbau und elektrische Erzeugnisse anzunehmende Preissteigerung zwischen dem Referenzzeitpunkt und dem Zeitpunkt t für einen jährlichen Veränderungswert pf_e [%] nach Abbildung 45 (e)

- $PF_{x,f}(t) = (1 + pf_f/100)^t$: aus dem Preisindex für elektrischen Strom an gewerbliche Anlage anzunehmende Preissteigerung zwischen dem Referenzzeitpunkt und dem Zeitpunkt t für einen jährlichen Veränderungswert pf_f [%] nach Abbildung 45 (f)

Über die oben angeführten Preissteigerungsfaktoren hinaus besteht die Möglichkeit, weitere Preisindizes zu integrieren oder die genannten Preisindizes für den Fall fortzuschreiben, dass neueste Entwicklungen abgebildet werden sollen. Zur Berücksichtigung der Unsicherheiten, die aus der Abschätzung der Preisindizes hervorgehen, gehen drei Werte in das Analysemodell ein. Diese Werte sollten sich, soweit keine aktuelle Fortschreibung für die Preisindizes vorliegt, an den in Abbildung 45 (a) bis (f) eingetragenen Grenzwerten sowie einem aus diesen Grenzwerten zu ermittelnden Mittelwert orientieren.

Die nominale Zeit-/Kostenmatrix beinhaltet ausschließlich zeitunabhängige Zahlungswerte – dies gilt auch für die in Abschnitt 5.3.3 beschriebene Vorgabe von Faktoren zur Erfassung nicht jährlich wiederkehrender oder für die Auf- oder Abwertung periodischer Zahlungen. Da jedoch fortan Preisentwicklungen zwischen dem Referenzzeitpunkt und einem späteren Zeitpunkt einbezogen werden sollen, wird die Kenntnis der einzelnen Zahlungszeitpunkte vorausgesetzt. Die für die Lebenszykluskostenanalyse von Tunnelbauwerken relevanten Zahlungen lassen sich, wenn es sich um Kosten handelt, entweder auf die Initialkosten für eine Komponente $C_{i,j}$ oder im Falle von Erlösen auf die Einnahmen G für das gesamte Tunnelbauwerk zurückführen. Beide Größen weisen den Preisstand des Referenzzeitpunktes auf und müssen durch Preissteigerungsfaktoren angepasst werden. Diese Vorgehensweise hat zur Folge, dass sämtliche Initial- und Folgekosten sowie die ggf. vorhandenen Erlöse eine Funktion der Zeit darstellen. In der Reihenfolge, die sich bereits im vorherigen Abschnitt etabliert hat, sollen nun die von der Zeit abhängigen Funktionen für die Initial- und Folgekosten sowie für die Erlöse eingeführt werden. Dazu muss der Preissteigerungsfaktor $PF_{x,y}(t)$ in die Berechnungsvorschriften integriert werden. Der allgemeine Charakter des Preissteigerungsfaktors $PF_{x,y}(t)$ ermöglicht es dem Anwender, einen der Situation angemessenen Faktor in die Berechnungsvorschriften aufzunehmen.

Für jedes Projekt bzw. für alle Projektvarianten, die miteinander verglichen werden sollen, ist, wie beispielsweise in Abbildung 37 veranschaulicht, ein einheitlicher Referenzzeitpunkt $t = 0$ zu wählen. Wie in Abschnitt 5.3.3 beschrieben, besitzen sämtliche der in der nominalen Zeit-/Kostenmatrix abgebildeten Zahlungen den einheitlichen Preisstand des Referenzzeitpunktes. Für jede Komponente j , deren Initialkosten nicht zum Referenzzeitpunkt anfallen – also für alle $t_{in,j} \neq 0$ – sind unter Berücksichtigung der Preisentwicklung reale Preise zu ermitteln. Per Definition wurde festgelegt, dass Folgekosten erstmalig im Jahr nach Wertstellung der Initialkosten entstehen, so dass die Folgekosten immer auf reale Preisstände hochzurechnen sind. Für die Gliederung der Formeln zur Errechnung der realen Werte wird erneut die Nomenklatur benutzt, die auch für die Auflistung der nominalen Berechnungsvorschriften herangezogen wurde. Der den einzelnen Gliederungspunkten in Klammern hinzugefügte Zusatz „r“ bezeichnet den realen Charakter der Zahlungen:

I.0(r) In Abhängigkeit vom Zeitpunkt $t_{in,j}$, zu dem die Komponente j erstmalig in Betrieb geht, errechnen sich die realen Initialkosten wie folgt:

$$C_{i,j}(t_{in,j}) = PF_{i,y}(t_{in,j}) * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{i,j}(t_{in,j}) = PF_{i,y}(t_{in,j}) (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1a(r) Für jedes Jahr, das auf die Realisierung der Initialkosten bis zum Erreichen des Berechnungshorizonts folgt, sind die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten zu bestimmen:

$$\text{für } t > t_{in,j}: C_{o,j}(t) = PF_{o,y}(t) * p_{o,j} * C_{i,j} \text{ bzw. } C_{o,j}(t) = PF_{o,y}(t) * p_{o,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

F.1b(r) Optionale Bestimmung der Betriebs- und Funktionserhaltungskosten unter Verwendung einer separaten Faktorisierung für Energie- und Instandhaltungsaufwendungen:

$$\text{für } t > t_{in,j}: C_{o,j}(t) = [PF_{e,y}(t) * p_{e,j} + PF_{m,y}(t) * p_{m,j}] * C_{i,j} \text{ bzw.}$$

$$C_{o,j}(t) = [PF_{e,y}(t) * p_{e,j} + PF_{m,y}(t) * p_{m,j}] * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$$

- F.1c(r) Wie unter F.1b(r) beschrieben, jedoch besteht zusätzlich die Möglichkeit, für den Instandhaltungsaufwand zwischen der Inbetrieb- bzw. der Wiederinbetriebnahme und dem Funktionsausfall bzw. der Außerbetriebnahme für die Komponente j eine lineare Steigung vorzusehen:

für $t_{In,j} + k * s_j \leq t \leq t_{In,j} + (k + 1) * s_j$:

$$C_{o,j}(t) = \left(PF_{e,y}(t) * p_{e,j} + PF_{m,y}(t) * \left(p_{m,j} + g_{m,j} * \frac{t+s_j - [(k+1)*s_j + t_{In,j}]}{s_j} \right) \right) * C_{i,j} \quad (\text{Formel 5.4})$$

bzw.

$$C_{o,j}(t) = \left(PF_{e,y}(t) * p_{e,j} + PF_{m,y}(t) * \left(p_{m,j} + g_{m,j} * \frac{t+s_j - [(k+1)*s_j + t_{In,j}]}{s_j} \right) \right) * C_{i,j} * (1 \pm w_j) \quad (\text{Formel 5.5})$$

wobei $k = \{1, 2, \dots, q_{j-1}\}$

Die Kennzahl $k = 1$ bezeichnet beispielsweise den ersten Austausch nach der Erstinstallation

- F.2a(r) Kosten für den planmäßigen vollständigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer. Die Austauschkosten leiten sich aus den Initialkosten ab:

für $t = t_{In,j} + k * s_j$: $C_{r,j}(t) = PF_{r,y}(t) * C_{i,j}$ bzw. $C_{r,j}(t) = PF_{r,y}(t) * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$

- F.2b(r) Optionale Kosten für den planmäßigen Austausch der Komponente j nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer, wobei für jeden Austauschvorgang der Austauschgrad, welcher direkt von den Initialkosten abhängt, anzugeben ist:

für $t = t_{In,j} + k * s_j$: $C_{r,j}(t) = PF_{r,y}(t) * e_{k,j} * C_{i,j}$ bzw. $C_{r,j}(t) = PF_{r,y}(t) * e_{k,j} * (1 \pm w_j) * C_{i,j}$

- E.1a(r) Jährlich wiederkehrende Erlöse aus Maut oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite w^g [-]:

für $0 < t \leq d$: $G(t) = PF_{g,y}(t) * G$ bzw. $G(t) = PF_{g,y}(t) * (1 \pm w^g) * G$

- E.1b(r) Erlöse aus Maut oder sonstigen Verfügbarkeitszahlungen, wobei die Erlöse optional in Abhängigkeit der prognostizierten Einflüsse einer separaten Faktorisierung unterliegen:

für $0 < t \leq d$: $G(t) = PF_{g,y}(t) * e^g(t) * G$ bzw. $G(t) = PF_{g,y}(t) * e^g(t) * (1 \pm w^g) * G$

wobei der Faktor $e^g(t)$ [-] den für jedes Betriebsjahr zu definierenden Erlösfaktor beschreibt

Vergleichbar zur in Tabelle 25 dargestellten nominalen Matrix sind nun alle Voraussetzungen geschaffen, die reale Zeit-/Kostenmatrix zu errechnen. Bevor jedoch diese als Teil der endgültigen Ergebnismatrix angeführt wird, erfolgen zunächst noch Erläuterungen zum letzten erforderlichen Berechnungsschritt, der Ermittlung der Barwerte.

Voraussetzung für die Ermittlung der Barwerte ist die Summierung der realen Kosten und Erlöse für jeden einzelnen Zeitpunkt $t = 0$ bis $t = d$. Die Summe der Zahlungen $S(t)$ setzt sich aus jeglichen, ggf. für den Zeitpunkt t vorhandenen realen Initial-, Betriebs- und Funktionserhaltungs- und Austauschkosten sowie den Erlösen zusammen:

$$S(t) = \sum_{j=1}^n [C_{i,j}(t) + C_{o,j}(t) + C_{r,j}(t) + G(t)], \text{ wobei } t = \{0, 1, \dots, d\} \quad (\text{Formel 5.6})$$

Unter Hinzuziehung des Kapitalzinssatzes i erfolgt im Anschluss daran die Errechnung der Barwerte für jede einzelne zuvor ermittelte Summe $S(t)$:

$$BW(t) = \frac{S(t)}{(1+i)^t}, \text{ wobei } t = \{0, 1, \dots, d\} \quad (\text{Formel 5.7})$$

Werden die so errechneten Barwerte grafisch über die Zeit aufgetragen, so stellen die Kurvenverläufe, da einzelne Eingangsparameter mit Bandbreiten versehen wurden, ein ganzes Spektrum an Ergebnissen dar.

Dadurch, dass die im Folgenden genannten Eingangsparameter mit Schwankungsbreiten versehen werden, ergeben sich die im Anschluss an die Aufzählung genannten Konsequenzen:

- Oberer, mittlerer und unterer Wert für die Initialkosten C_{ij} einer Komponente, ausgedrückt durch den Schwankungswert $(1 \pm w_j)$. Die Schwankung der Initialkosten schlägt sich infolge der Verkettung mit den Folgekosten auch auf die Betriebs- und Funktionserhaltung sowie die Aufwendungen zum Austausch einer Komponente nieder. Da auch die Erlöse G als eine Komponente eines Bauwerks angesehen werden, gilt Gleiches auch für die Schwankung der Erlöse $(1 \pm w^g)$,
- Berücksichtigung des Preissteigerungseinflusses durch Vorgabe eines unteren, mittleren bzw. oberen Werts. Die Preissteigerung wird aus unterschiedlichen Indizes abgeleitet. In der Regel kommen im Rahmen einer Analyse zeitgleich mehrere Preissteigerungsindizes (Energie, Bausektor etc.) zur Anwendung. Dabei gilt das folgende Prinzip: Alle aus verschiedenen Indizes hergeleiteten Werte gehören dem unteren, dem mittleren oder dem oberen Spektrum an,
- Auch der Kapitalzinssatz wird einer Sensitivitätsbetrachtung unterzogen. Wie in Abschnitt 4.4.5.4 erläutert, werden die drei realen Zinssätze in Höhe von 2, 3 und 5 % p.a. für die Analyse der Lebenszykluskosten von Infrastrukturbauwerken untersucht.

Bei der Auswertung der Ergebnisse ist darauf zu achten, dass die möglichen Kombinationen von Eingangsparametern Berücksichtigung finden. Wird das Potenzial für die zuvor beschriebenen Schwankungen der Eingangsparameter in vollem Umfang ausgenutzt, so ergeben sich für eine Bauwerksvariante maximal $3^3 = 27$ unterschiedliche Barwertverläufe. Diese Verläufe lassen sich durch eine Einhüllende umschließen. Die Einhüllende setzt sich dabei ggf. aus Kurvenästen zusammen, die die unterschiedlichen Annahmen für die einzelnen Parameter widerspiegeln.

Aus der Summierung der Barwerte $BW(t)$ über die gesamte Lebenszyklusdauer d ergibt sich schließlich für die untersuchte Bauwerksvariante der Kapitalwert KW zum Referenzzeitpunkt. Auch hierbei können pro Bauwerksvariante maximal bis zu 27 Kapitalwerte errechnet werden:

$$KW = \sum_{t=0}^d BW(t) \quad (\text{Formel 5.8})$$

Die Höhe des Kapitalwertes stellt das entscheidende Kriterium zur Beurteilung einer Bauwerksvariante dar. Es muss allerdings einschränkend darauf hingewiesen werden, dass der höchste Kapitalwert nur zum Ausdruck bringt, welche Variante innerhalb der untersuchten Alternativen die größte Vorteilhaftigkeit besitzt. Ob mit dem lebenszyklusorientierten Planungsansatz dabei auch alle Potenziale aus wirtschaftlicher Sicht ausgeschöpft werden, wird durch das Ergebnis indes nicht vermittelt. Dem Lebenszykluskostenansatz wohnt nur dann ein Vorteil inne, wenn der Planer bzw. der Bauwerksbetreiber über einen entsprechenden Erfahrungsschatz verfügt und möglichst viele Varianten untersucht.

Auf die exemplarisch zur Entwicklung der nominalen Zeit-/Kostenmatrix (Tabelle 25) getroffenen Annahmen für die Komponenten $j = 1, 2, 3$ soll mit dem Ziel, eine Ergebnismatrix zu entwickeln, zurückgegriffen werden. Die mit Tabelle 26 benannte Ergebnismatrix setzt sich im oberen Teil aus der realen Zeit-/Kostenmatrix, im unteren Teil aus der Errechnung der Bar- und Kapitalwerte zusammen.

		Zeitpunkt t [a]						
		0	1	2	...	10	...	d
Komponente j	1	$-C_{i,1} * (1 \pm w_1) * PF_{i,y}(t_0) * a_1$	$-(PF_{e,y}(t_1) * p_{e,1} + PF_{m,y}(t_1) * p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1$	$-(PF_{e,y}(t_2) * p_{e,1} + PF_{m,y}(t_2) * p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1$	...	$[-(PF_{e,y}(t_{10}) * p_{e,1} + PF_{m,y}(t_{10}) * p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} - PF_{r,y}(t_{10}) * e_{1,1} * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1]$	...	$-(PF_{e,y}(t_d) * p_{e,1} + PF_{m,y}(t_d) * p_{m,1}) * (1 \pm w_1) * C_{i,1} * a_1$
	2			$-C_{i,2} * (1 \pm w_2) * PF_{i,y}(t_2) * a_2$	...	$[-(PF_{e,y}(t_{10}) * p_{e,2} + PF_{m,y}(t_{10}) * p_{m,2}) * [t + s_j - ((k+1) * s_j + t_{n,2}) / s_2] * (1 \pm w_2) * C_{i,2} - C_{i,2} * (1 \pm w_2) * PF_{r,y}(t_{10}) * a_2]$	...	$-C_{i,2} * (1 \pm w_2) * PF_{r,y}(t_d) * a_2$
	3		$e^g(t_1) * (1 \pm w^g) * PF_{g,y}(t_1) * G$	$e^g(t_2) * (1 \pm w^g) * PF_{g,y}(t_2) * G$	...	$e^g(t_{10}) * (1 \pm w^g) * PF_{g,y}(t_{10}) * G$	...	$e^g(t_d) * (1 \pm w^g) * PF_{g,y}(t_d) * G$

	n	$-C_{i,n} * (1 \pm w_n) * PF_{i,y}(t_0) * a_n$	$-(PF_{e,y}(t_1) * p_{e,n} + PF_{m,y}(t_1) * p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n$	$-(PF_{e,y}(t_2) * p_{e,n} + PF_{m,y}(t_2) * p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n$	...	$[-(PF_{e,y}(t_{10}) * p_{e,n} + PF_{m,y}(t_{10}) * p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} - PF_{r,y}(t_{10}) * e_{1,n} * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n]$	...	$-(PF_{e,y}(t_d) * p_{e,n} + PF_{m,y}(t_d) * p_{m,n}) * (1 \pm w_n) * C_{i,n} * a_n$
S(t)	S(t ₀)	S(t ₁)	S(t ₂)	...	S(t ₁₀)	...	S(t _d)	
BW(t)	$BW(t_0) = \frac{S(t_0)}{(1+i)^0}$	$BW(t_1) = \frac{S(t_1)}{(1+i)^1}$	$BW(t_2) = \frac{S(t_2)}{(1+i)^2}$	...	$BW(t_{10}) = \frac{S(t_{10})}{(1+i)^{10}}$	...	$BW(t_d) = \frac{S(t_d)}{(1+i)^d}$	

Tabelle 26: Die Ergebnismatrix

Da bis zu dieser Stelle alle Voraussetzungen zur Errechnung der Ergebnismatrix behandelt wurden, endet die theoretische Erläuterung der Lebenszykluskostenanalyse. Die verbleibenden Abschnitte des fünften Kapitels widmen sich einerseits der Umsetzung der aufgezeigten Berechnungsmethodik, andererseits werden schrittweise zwei Anwendungsszenarien für die Lebenszykluskostenanalyse von Straßentunneln entwickelt.

5.4 Beschreibung des Analysemodells

5.4.1 Programmtechnische Realisierung

Aus der in den vorangestellten Abschnitten beschriebenen Aufstellung von Zeit-/Kostenmatrizen wird ersichtlich, dass die Berechnung der Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – insbesondere auch wegen der Berücksichtigung von Schwankungsbreiten der einzelnen Eingangsparameter – mit einem großen Rechenaufwand verbunden ist. Für sich in Schleifen wiederholende Rechenoperationen sowie zur Erzeugung einer abschließenden grafischen Darstellung der Ergebnisse bietet sich die Arbeitsweise eines Tabellenkalkulationsprogramms an. Für die Automatisierung der Berechnungsroutinen wurde aufgrund des hohen Verbreitungsgrades und der vielen Softwareanwendern vertrauten Arbeitsweise das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft EXCEL[®] ausgewählt. Damit soll dem interessierten Anwender einerseits ein einfacher Einstieg in die Lebenszykluskostenanalyse ermöglicht werden, andererseits können die gewonnenen Rechenergebnisse für weiterführende Ergebnisinterpretationen auf einfache Weise in andere Kalkulationsblätter übernommen werden.

Für die Programmierung der Lebenszykluskostenanalyse ist die Version EXCEL 2007 für Windows-Anwendungen (Version 12.0) zum Einsatz gekommen. Mit der Eingabe von Daten in das erarbeitete Analyseinstrument erfolgt die Steuerung von Befehlen und Berechnungsabläufen auf Basis der Skriptsprache „Visual Basic for Application“ (VBA). Bei der Programmiersprache VBA handelt es sich um ein Unterprogramm, welches standardmäßig zum Umfang der Softwareanwendung EXCEL gehört. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass einer Ausführung von Makros, soweit dies nicht standardmäßig auf dem genutzten

Rechner voreingestellt ist, mit dem Öffnen der Datei separat zugestimmt werden muss. Anderenfalls kann die Analyse der Lebenszykluskosten nicht ausgeführt werden.

Die teilweise sehr umfangreiche Verknüpfung von Berechnungszellen mit mathematischen Operationen hat es erforderlich gemacht, Zellen vor Veränderungen zu schützen. Dadurch wird sichergestellt, dass – gewollt oder ungewollt – Zelleninhalte nicht abgeändert werden können. Zellen, die eine für die Lebenszykluskostenanalyse relevante Eingabe von Daten erfordern, sind hingegen farblich hinterlegt und ungeschützt. Bezüglich der detaillierten Erläuterung der Dateneingabe wird auf den Abschnitt 5.4.2 verwiesen.

Die Struktur des EXCEL-Tools wurde so gewählt, dass jeweils nach der sequentiellen Eingabe von Daten die Berechnungsroutinen durch das Auslösen eines Berechnungsbuttons erfolgen. Aufgrund der für VBA charakteristischen Berechnungssystematik können in Abhängigkeit von der zu betrachtenden Anzahl an Komponenten, der Dauer des Lebenszyklus sowie der Kapazität des Rechners zeitlich ausgedehnte Rechenzeiten anfallen. Für einen Laptop-Computer, der mit einem Intel®Core™ i3 CPU-Prozessor ausgestattet ist, beträgt die Rechenzeit für ein 15 Komponenten umfassendes Tunnelbauwerk unter Ansatz der höchsten Detailschärfe über einen Berechnungshorizont von 80 Jahren etwa 35 Minuten. Diese Berechnungsdauer umfasst die Analyse jeder einzelnen Komponente sowie die Verknüpfung der Einzelergebnisse in einer zusammenfassenden Zeit-/Kostenmatrix. Unter der Berücksichtigung von unsicheren Eingangsparametern wurden für das Rechenbeispiel die maximal mögliche Anzahl von 27 Barwertverläufen sowie die maximal möglichen neun Verläufe der Folgekostenindizes errechnet.

5.4.2 Modulare Modellkonfiguration

Die Tabellenkalkulation erfolgt in der EXCEL-typischen Weise in Tabellenblättern. Jedes einzelne Tabellenblatt repräsentiert dabei die bereits an früherer Stelle eingeführten Modultabellen. Für die Lebenszykluskostenanalyse existieren drei verschiedene Arten von Modultabellen. Die erste Modultabelle stellt den Ausgangspunkt jeder Lebenszykluskostenanalyse dar und ist mit „Tunnelkonfiguration“ bezeichnet (vgl. beispielhafte Darstellung in Anhang 2.1). Diese Tabelle erfordert die Eingabe von Daten, die das gesamte Tunnelbauwerk sowie den Zeithorizont der Untersuchung beschreiben. Zudem sind in dieser Tabelle Vorgaben zu den zu untersuchenden Preisentwicklungsindizes sowie zu den Kapitalzinssätzen aufzunehmen; diese Werte besitzen komponentenübergreifende Gültigkeit. Zellen, die eine Eingabe erfordern, sind entsprechend farblich markiert.

Neben diesen allgemeinen Angaben sind in der Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ alle Komponenten aufzuführen, aus denen sich das betrachtete Bauwerk zusammensetzt. Die einzelnen Komponenten $j = 1$ bis $j = n$ werden dabei durch Stichworte, z.B. „Innenschale, Abschnitt 1“, „Beleuchtung“, „Erlöse“ oder „Nordportal“ beschrieben. Ab dem Zeitpunkt, zu dem diese Festlegung erfolgt, sind Komponentenummer und Komponentenbezeichnung untrennbar miteinander verbunden. Sind die Eingaben vollständig, so wird durch die Aktivierung der Schaltfläche „Erzeuge Modultabellen“ die erforderliche Anzahl komponentenspezifischer Berechnungsblätter generiert. Voraussetzung dafür, dass die Schaltfläche betätigt werden kann, ist, dass sich der Cursor nicht innerhalb einer farblich hervorgehobenen Zelle befindet. Sodann wird für jede Komponente eine eigene Modultabelle erzeugt, wobei der einer Komponente zugewiesene Name im Register des Tabellenblatts erscheint. Anschließend muss jede Komponente durch die in Tabelle 24 genannten und erläuterten Angaben näher spezifiziert werden. Hierbei kommt den Initialkosten $C_{i,j}$ zentrale Bedeutung zu, durch entsprechende Faktorisierungen lassen sich die Folgekosten auf die Initialkosten zurückführen. Für jede Komponente kann individuell festgelegt werden, auf welchem Detaillierungsgrad die Analyse basieren soll. Zeichnet sich eine Komponente dadurch aus, dass zum Zeitpunkt der Aufstellung ein hoher Grad an Informationen verfügbar ist, so sind die Folgekosten bezüglich Betrieb, Instandsetzung und Austausch dem Wissensstand entsprechend vorzugeben. In diesem Zusammenhang sei auf die bereits im Abschnitt 5.4.3 diskutierten Anwendungsfälle in Verbindung mit Konkretisierungsgraden verwiesen.

Sind die Eingaben für eine Komponente abgeschlossen, so erfolgt unterhalb der Eingabemaske die grafische Darstellung der Barwerte für die Anzahl der unter Unsicherheiten untersuchten Fälle. Insgesamt existieren drei Diagramme für die Barwertverläufe, wobei zwischen einer geringen, einer mittleren und einer hohen Preissteigerung unterschieden wird. Drei weitere Diagramme, die ebenfalls nach den gewählten Stufen der Preisentwicklung differenzieren, setzen die diskontierten Folgekosten ins Verhältnis zu den Initialkosten. Weitergehende Interpretationen zu den Berechnungsergebnissen sowie deren Darstellung sind in den Abschnitten 5.5.3 und 5.6.3 enthalten.

Wurde die Eingabe der bauteilspezifischen Daten für jede Modultabelle einer Komponente fertiggestellt, kehrt der Anwender zum Modulblatt „Tunnelkonfiguration“ zurück. Durch das Auslösen der Schaltfläche „Berechne Gesamtergebnis“ werden die für die einzelnen Komponenten errechneten Barwertverläufe miteinander verkettet und zusammenfassend in die Modultabelle „Gesamtergebnis“ übernommen. Die grafische Darstellung des Gesamtergebnisses erfolgt in identischer Art und Weise wie für die einzelnen Komponenten.

5.4.3 Anwendungsvoraussetzungen und -möglichkeiten

Grundsätzlich können mit einer Lebenszykluskostenanalyse nur Alternativen miteinander verglichen werden, die dieselbe Zielstellung verfolgen und vollständig sind. Die Vollständigkeit einer Bauwerksvariante ist dann gegeben, wenn sämtliche lebenszykluskostenrelevanten Elemente berücksichtigt werden. Sollten diese beiden Voraussetzungen nicht erfüllt sein, so sind Kosten-Nutzen-Berechnungen oder andere Bewertungsverfahren anzuwenden.

Wie zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, bestehen die beiden Hauptanwendungsziele der Lebenszykluskostenanalyse darin, einerseits die Neuplanung sowie andererseits die Betriebsmodifizierung eines Tunnels unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu untersuchen. Beide Ziele zeichnen sich dadurch aus, dass sie mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden ausgestattet sind. Im ersten Fall liegen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Planungsphase zwar immer weiter zunehmend genauere Angaben vor, sie besitzen jedoch zu jeder Zeit den Stellenwert von Prognosen. Abweichend stellt sich die Situation hingegen für einen bereits in Betrieb befindlichen Straßentunnel dar. Liegen Daten zum Betrieb und zur Abbildung der Kosten eines Tunnels vor, so können diese unter dem Ansatz vergleichsweise verminderter Schwankungsbreiten zur Erfassung der Unsicherheit fortgeschrieben werden. Auch diese Werte repräsentieren Prognosen, ihr Validierungsgrad ist jedoch aufgrund der bisher dokumentierten Erfahrungswerte höher. Der Validierungsgrad bringt zum Ausdruck, auf welcher Datengrundlage die Auswahl eines Eingangsparameters erfolgt. Liegen für einen Wert wenig oder keine Erfahrungswerte vor, so ist der Validierungsgrad gering. Sind jedoch über eine zurückliegende Betriebsphase bereits Komponentendaten gesammelt worden, so ist der Validierungsgrad als entsprechend hoch einzuschätzen. Der Validierungsgrad wird an dieser Stelle lediglich als rein qualitative Größe eingeführt, die Quantifizierung bleibt dem Anwender überlassen. Implizit geht die Höhe des Validierungsgrades in die Wahl der Schwankungsbreite w_j ein.

Das entwickelte Lebenszykluskostentool ermöglicht zwei grundsätzliche Anwendungsmöglichkeiten. Die erste Anwendung, welche mit „PTLCC“ abgekürzt wird, steht als Synonym für „Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs“ und kommt für die Analyse der Lebenszykluskosten von Tunnelneubauprojekten zum Einsatz. Mit „OTLCC“ bzw. „Operational Tunnel Life-Cycle Costs“ wird die zweite Anwendung bezeichnet, welche für Bestandsbauwerke zur Ausführung kommt. Für die beiden Anwendungen gilt die übergreifende Regel, dass der Umfang der Eingangsdaten den jeweiligen Wissensstand widerspiegelt. Im Einzelnen zeichnen sich die beiden Anwendungen durch die folgenden Eigenschaften aus:

- PTLCC – In Abhängigkeit vom Umfang der vorliegenden Informationen sind die Elemente des zu errichtenden Tunnels zusammenzustellen. Hierzu werden zunächst die Rohbauelemente als separate Komponenten erfasst. Für eine frühe Projektphase kann beispielsweise zwischen Vortrieb und vorläufiger Si-
-

cherung, Einbau der Innenschale, der Erstellung von Kabelzugkanälen oder der Installation der technischen Betriebsausrüstung unterschieden werden. Liegen in einer fortgeschrittenen Planungsphase genauere Angaben vor, so bietet sich an, Tunnelabschnitte auf Grundlage von Regelquerschnitten zu unterteilen. Auch bei der Planung der Folgekosten ist davon auszugehen, dass in frühen Phasen zunächst globale Faktoren zur Abbildung der Betriebs- und Instandhaltungskosten sowie für den Austausch zur Anwendung kommen.

- OTLCC – Auf Grundlage der für ein Tunnelbauwerk existierenden Bestandsunterlagen lassen sich die einzelnen Elemente genau identifizieren. Unter Berücksichtigung der vorliegenden Kostenhistorie sollten die Komponenten so festgelegt werden, dass Kosten möglichst ohne eine weitere Zergliederung in die Analyse Eingang finden. Ein weiteres EXCEL-Tool kann dazu herangezogen werden, theoretische Nutzungsdauern für technische Komponenten zu ermitteln. Die für eine Komponente dokumentierten Ausfallzeitpunkte werden dazu statistisch ausgewertet und mit Hilfe der Weibull-Charakteristik beschrieben. Der Referenzzeitpunkt der Lebenszykluskostenanalyse für einen Bestandstunnel fällt in der Regel mit dem Zeitpunkt zusammen, zu dem der Tunnel auf Basis der veränderten Betriebsphilosophie wieder in Betrieb genommen wird.

Die skizzierten Anwendungsfälle PTLCC und OTLCC sollen in den Abschnitten 5.5 und 5.6 näher konkretisiert werden. Für beide Fälle gilt der Grundsatz, dass der Lebenszykluskostengedanke nur dann sinnvoll weiterentwickelt werden kann, wenn die Ergebnisse als dynamisch angesehen werden und eine konsequente Weiterverwendung des Tools erfolgt. Damit verbunden ist auch die Aufgabe, die zuvor getroffenen Annahmen wiederholt kritisch zu hinterfragen und ggf. an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. So erwächst aus einer in der Planungsphase begonnenen PTLCC-Anwendung mit der Zeit eine umfangreiche OTLCC-Datenbank. Durch die Implementierung weiterer Daten und Erkenntnisse wächst sukzessive die Robustheit des Analyseinstruments.

Als Ausgangsbasis für beide Anwendungen dient eine EXCEL-Datei, in die entsprechende Daten einzugeben sind. Mit dieser Systematik geht der Vorteil einher, dass das PTLCC-Instrument durch Zunahme des Detaillierungsgrades nach und nach den Stellenwert einer OTLCC-Anwendung annimmt.

5.5 PTLCC – Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs

5.5.1 Anwendung

Die Planung eines neu zu errichtenden Tunnels basiert einerseits auf Vorgaben, die durch die Örtlichkeit bestimmt werden, andererseits sind gültige Richtlinien, Normen sowie darüber hinaus gehende Vorgaben einzuhalten. Die Kombination aus projektspezifischen und allgemeingültigen Rahmenbedingungen führt sukzessive dazu, ein Bauwerk aus statischer und betriebstechnischer Sicht zu dimensionieren.

Insbesondere vor dem Hintergrund, dass während einer frühen Planungsphase der Umfang an Informationen und somit die Detailschärfe der Planung stark limitiert sind, muss der lebenszykluskostenorientierten Planung ein hohes Maß an Aufmerksamkeit gewidmet werden. Diese Forderung lässt den Rückschluss zu, dass die Abschätzung sämtlicher Initial- und Folgekosten einen richtungsweisenden Einfluss auf das weitere Schicksal des Gesamtprojektes ausübt. Ergibt sich aus den in Abschnitt 3.5.4 erläuterten Stufen der Bau- und Baunutzungskostenermittlungen (Tabelle 10) eine Überschreitung des angestrebten Gesamtbudgets, so besteht die Gefahr, dass das Projekt seitens des Bauherrn nicht weiter verfolgt wird. Genau an diesem Punkt setzt das auf den Lebenszykluskosten basierende Planungskonzept an. Ein derartiger Ansatz ermöglicht es, weitere Alternativplanungen zu untersuchen sowie bisher unberücksichtigte Effizienzsteigerungen zu aktivieren.

Die Hauptadressaten der PTLCC-Anwendung sind die öffentliche Hand sowie Anbieter von Bau- und Betreiberleistungen. Das EXCEL[®]-Tool kann z.B. ergänzend bei der Ausarbeitung der Ausschreibungsunterlagen zum Einsatz kommen. In diesem Kontext ist es auch denkbar, dass der Bauherr konkrete Forderungen in die Ausschreibungsunterlagen integriert, welche Bedingungen für die Instandsetzung oder die Wiederbeschaffung von Komponenten enthalten. Als Ergänzung zu einschlägigen Normen, die die zeichnerische Darstellung und die Beschreibung des errichteten Bestandes definieren, kann zudem vertraglich vereinbart werden, dass Inspektions- und Wartungskonzepte sowie genaue Beschreibungen der eingesetzten Komponenten und Kontaktdaten zur Wiederbeschaffung durch den Auftragnehmer vorzulegen sind. Um die Folgekostenplanung unmittelbar nach der Bauwerksfertigstellung aktualisieren zu können, sollten zudem die Initialkosten zur Beschaffung einer Komponente verfügbar gemacht werden.

Nachdem Bieter ihre Angebote eingereicht haben, ist das Tool potenziell auch dazu geeignet, die Angebotswertung sowie den Vergabeprozess zu begleiten. Schreibt die öffentliche Hand ein ÖPP-Tunnelprojekt aus, so kann die PTLCC-Anwendung dabei behilflich sein, die Höhe einer ggf. erforderlichen Anschubfinanzierung zu ermitteln, sowie den Zustand festzuschreiben, zu dem das Bauwerk nach Ablauf der Konzessionsdauer an die öffentliche Hand zu übertragen ist.

Bei Bietern von Bau- und Betreiberleistungen kann das Tool hingegen vor dem Hintergrund Anwendung finden, um Nebenangebote auszuarbeiten oder im Falle von ÖPP-Projekten die an den Bauprozess anschließende Betreiberphase technisch und monetär abzubilden. Besteht bei der Anwendung eines konventionellen Bauvertrags die Herausforderung darin, die Vertragssumme im Zuge der Erstellung der Arbeitskalkulation in keinem Falle zu überschreiten, so muss die gleiche Forderung auch für die durch eine Lebenszykluskostenanalyse ermittelten Folgekosten gelten. Nur unter der Voraussetzung, dass sich der Betrieb des Tunnelbauwerks an den Vorgaben dieser Folgekosten-Arbeitskalkulation orientiert, wird die mit einem ÖPP-Projekt beabsichtigte Erzielung einer Rendite ermöglicht.

Grundsätzlich ist die Anwendung des PTLCC-Instruments auch für Tunnelbauwerke denkbar, die andere Funktionen als die Durchleitung des Straßenverkehrs aufweisen. Bedingungen für eine erfolgreiche Anwendung sind dann jedoch, dass die Kostenverursacher identifiziert und Charakteristiken des Bauwerks in der Lebenszykluskostenanalyse abgebildet werden.

5.5.2 Aufbau und Umfang der Dateneingabe

Ausgangspunkt jeder Lebenszykluskostenanalyse ist die Implementierung allgemeiner Projektdaten in die mit „Tunnelkonfiguration“ bezeichnete Modultabelle. Dabei geht insbesondere von der Festlegung des Zeitraums, über den die Lebenszykluskostenanalyse erfolgen soll, ein maßgeblicher Einfluss aus. Unterschieden wird zwischen zwei Konstellationen: Im ersten Fall wird der gesamte Zeitraum von der Errichtung bis zur endgültigen Verwertung des Bauwerks abgebildet, für den zweiten Fall, bei dem es sich um ein ÖPP-Projekt handeln kann, erfolgt die Untersuchung über die vereinbarte Konzessionsdauer. Beide Konstellationen lassen erkennen, dass die zeitlichen Vorgaben Einflüsse auf die Gesamtwirtschaftlichkeit ausüben. Ist für den ersten Fall davon auszugehen, dass der Tunnel am Ende des Betrachtungshorizontes entweder einer Generalsanierung unterzogen, außer Betrieb genommen wird oder eine gänzlich andere Nutzung erfährt, so folgt mit dem Erreichen der Konzessionsdauer immer die unmittelbare Fortführung der Tunnelnutzung. Für den zweiten Fall ist also schon in einer frühen Phase sicherzustellen, dass das Tunnelbauwerk die im Konzessionsvertrag festgelegten Qualitätsanforderungen zum Zeitpunkt der Rückführung an den Konzessionsgeber erfüllt.

Wurde der projektspezifische Zeithorizont fixiert, so muss der Anwender über die Anzahl der Komponenten entscheiden, die das betrachtete Tunnelbauwerk in der gegenwärtigen Planungsphase hinreichend genau beschreibt. Die Auswahl der für einen Straßentunnel relevanten Komponenten erfolgt unter Hinzuziehung

der in Abschnitt 4.3.4 enthaltenen Tabellen 17 und 18. Mit Auswahl der notwendigen Rohbauelemente sowie der benötigten betriebstechnischen Einrichtungen fällt die Forderung zusammen, dass die Schnittstellen zwischen einzelnen Komponenten logisch definiert und sämtliche Bauteile nur einer Komponente eindeutig zuzuordnen sind. Dieser Aspekt soll an einem Beispiel verdeutlicht werden: Es wird angenommen, dass in die Tunnelinnenschale Leerrohre für die spätere Durchführung von Versorgungskabeln zu integrieren sind. Diese können entweder der Tunnelinnenschale selbst, einer gesonderten Position oder der Komponente, für deren Versorgung die Integration der Leerrohre erforderlich ist, zugeordnet werden.

Im Zuge der weiteren Bearbeitung sind die für jede Komponente generierten Modultabellen mit Daten zu versehen. Neben der theoretischen Nutzungsdauer a_j einer Komponente sind die Initialkosten $C_{i,j}$ zu spezifizieren, die die einmaligen Kosten zur betriebsbereiten Installation der Komponente zum Ausdruck bringen. Mit der Angabe der Initialkosten ist zugleich die Vorgabe der Schwankungsbreite w_j verbunden; diese wird mit den Initialkosten verknüpft und sollte den aktuellen Stand der Planungen widerspiegeln. Liegen keine genaueren Erkenntnisse zur Wahl der Größe w_j vor, so sind die Tabelle 19 und die Abbildung 31 in Verbindung mit den Erläuterungen in Abschnitt 4.4.1 zu beachten. An dieser Stelle soll noch einmal darauf hingewiesen werden, dass sich sämtliche Folgekosten auf die Initialkosten einer Komponente beziehen. Damit geht die Konsequenz einher, dass sich die für die Initialkosten festgelegte Schwankungsbreite w_j auch auf die Folgekosten überträgt.

Da die Kostenunsicherheit bei der PTLCC-Anwendung in der Regel hoch und die Anzahl der Gesamtkomponenten aufgrund der nur wenig ausgeprägten Planungstiefe beschränkt sind, erfolgt für die Betriebs- und Funktionserhaltungskosten $C_{o,j}$ eine pauschale Berücksichtigung durch den Faktor $p_{o,j}$, der die jährlichen Aufwendungen wiedergibt. Dieser erste Folgekostenanteil beinhaltet alle Kosten, die im Zeitraum zwischen der planmäßigen In- und Außerbetriebnahme einer Komponente anfallen. Diese setzen sich aus Inspektion, Wartung und Instandsetzung zusammen und beinhalten Anteile für Lohn, Ersatzteile und etwaige Betriebs- einbußen durch verkehrliche Einschränkungen. Wird ein Rahmenwartungsvertrag für eine Gruppe von Komponenten abgeschlossen oder lassen sich die Aufwendungen nicht nur auf eine Komponente beschränken, so kann beispielsweise eine separate Komponente „Rahmenwartungsvertrag“ mit jährlicher Wiederholung vorgesehen werden. Für die schwankungsbehaftete Untersuchung der Betriebs- und Funktionserhaltungskosten ergeben sich mit Bezug zum Referenzzeitpunkt die folgenden nominalen Zusammenhänge:

- ungünstigster Fall (disadvantageous): $C_{o,j}^d = p_{o,j} * C_{i,j} * (1 + w_j)$
- mit der größten Eintrittswahrscheinlichkeit verbundener Fall (medium): $C_{o,j}^m = p_{o,j} * C_{i,j}$
- günstigster Fall (advantageous): $C_{o,j}^a = p_{o,j} * C_{i,j} * (1 - w_j)$

Ein zweiter Folgekostenanteil bildet die in größeren zeitlichen Intervallen wiederkehrenden Austauschkosten ab. In erster Näherung wird davon ausgegangen, dass die nominalen, in Abhängigkeit von der theoretischen Nutzungsdauer einer Komponente zu berücksichtigenden Austauschkosten den Initialkosten entsprechen. Auch hierin findet die Schwankungsbreite w_j Eingang.

Sobald für alle Komponenten der zuvor erläuterte Mindestumfang an Daten in das PTLCC-Tool eingegeben wurde, kann die Ergebnisberechnung über die Schaltfläche „Berechne Gesamtergebnis“ in der Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ ausgelöst werden. Da für einen Berechnungsdurchgang pro Komponente nur eine theoretische Nutzungsdauer anzugeben ist, sollte die Berechnung ggf. unter Variation der Nutzungsdauer wiederholt werden. Grundsätzlich sind die theoretischen Nutzungsdauern der Komponenten nach Abbildung 43 oder gemäß Tabelle 22 in Abschnitt 4.4.5.2 zu bestimmen. Eine Differenzierung von Nutzungsdauern nach maximalen bzw. minimalen Werten ist mit Verweis auf die Ausführungen in Abschnitt 4.4.5.2 nicht zielführend und nicht Gegenstand der mit der lebenszyklusorientierten Planung einhergehenden Strategie.

5.5.3 Berechnungsergebnisse und deren Interpretation

Die Berechnung der Lebenszykluskosten erfolgt unter Verknüpfung der Vorgaben, die einerseits für das gesamte Projekt Gültigkeit haben und andererseits ausschließlich für die zu betrachtende Komponente relevant sind. Zu den projektübergreifenden Vorgaben zählen die verschiedenen Preisindizes, für die untere, mittlere und obere Werte zur Erfassung der jährlichen Preisentwicklung anzugeben sind. Abhängig von den Bedingungen des Kapitalmarktes – und somit ebenfalls von projektübergreifender Bedeutung – ist der Kapitalzinssatz. Für den Zinssatz sind in das Berechnungsmodell ebenfalls drei Werte zu implementieren. Als dritte Größe sind Initial- und Folgekosten sowie die damit verbundenen Unsicherheiten vorzugeben. Die Unsicherheit wird durch das Schwankungsintervall w_j ausgedrückt und ermöglicht es, einen oberen und einen unteren Wert der Initial- und Folgekosten zu bestimmen. Die Angabe des Schwankungsintervalls w_j erfolgt individuell für jede Komponente j und unterscheidet sich damit von der Vorgabe der Preisindizes bzw. der Kapitalzinssätze, welche komponentenunabhängig und somit pauschal für das Gesamtprojekt vorgegeben werden.

Da für die drei im vorangestellten Absatz beschriebenen Eingangsparameter neben den Mittelwerten auch extreme Randwerte Berücksichtigung finden, nimmt die Lebenszykluskostenbetrachtung den Stellenwert einer Sensitivitätsanalyse an. Werden für diese drei Eingangsparameter jeweils drei Werte zur Abbildung des Schwankungsspektrums untersucht, so ergeben sich für die Ergebnisdarstellung die an früherer Stelle ermittelten 27 Kombinationsmöglichkeiten. Zur Erhöhung der Übersichtlichkeit und um eine schnelle Entschlüsselung dieser Kombinationen zu ermöglichen, wird eine Kurzschreibweise aus Buchstaben eingeführt. Jede Kurzschreibweise wird durch eine Pfeildarstellung ergänzt, mit der eine qualitative Aussage zur Größenordnung des jeweiligen Eingangsparameters verbunden ist. Im Einzelnen sind die Abkürzungen wie folgt definiert:

- Kurzschreibweise für die drei Eingangsparameter:
 - PSR = Preissteigerungsrate
 - KZS = Kapitalzinssatz
 - IFK = Initial- und Folgekosten
- Bedeutung der Pfeildarstellungen:
 - ↓ = unterer bzw. geringer Wert
 - = mittlerer Wert
 - ↑ = oberer bzw. hoher Wert

Die beispielhafte Kombination aus mittlerer Preissteigerungsrate, geringem Kapitalzinssatz und hohen Initial- und Folgekosten nimmt hiernach die folgende Kurzdarstellung an: PSR → KZS ↓ IFK ↑.

Aus der im oberen Teil der Abbildung 51 gezeigten Tabelle lassen sich die genannten 27 Kombinationsmöglichkeiten entwickeln: Dazu muss in die neun Tabellenzellen, wie durch Pfeile angedeutet, jeweils ein Wert für geringe, mittlere und hohe Initial- und Folgekosten eingefügt werden. Für jede Kombinationsmöglichkeit lässt sich ein entsprechender Realkosten- bzw. Barwertverlauf errechnen.

Der untere Teil der Abbildung 51 beschreibt den Darstellungsumfang der Berechnungsergebnisse. Unterschieden wird hierbei zwischen der Darstellung auf Komponenten- und auf Gesamtergebnisebene. Um das gesamte Datenaufkommen zu entzerren, werden die Ergebnisse auf drei identisch aufgebaute Diagramme verteilt. Im Zuge der Modellentwicklung hat es sich als sinnvoll erwiesen, für geringe, mittlere und hohe Preissteigerungsraten separate Diagramme zur Verfügung zu stellen. In jeder Komponenten-Modultabelle sind daher die Diagrammtypen K.1 bis K.3 enthalten, in der Gesamtergebnis-Modultabelle befinden sich die Diagramme G.1 bis G.3. Die Diagramme G.1 bis G.3 spiegeln die Barwertsumme aller Komponenten wider, die das Tunnelbauwerk vollumfänglich beschreiben.

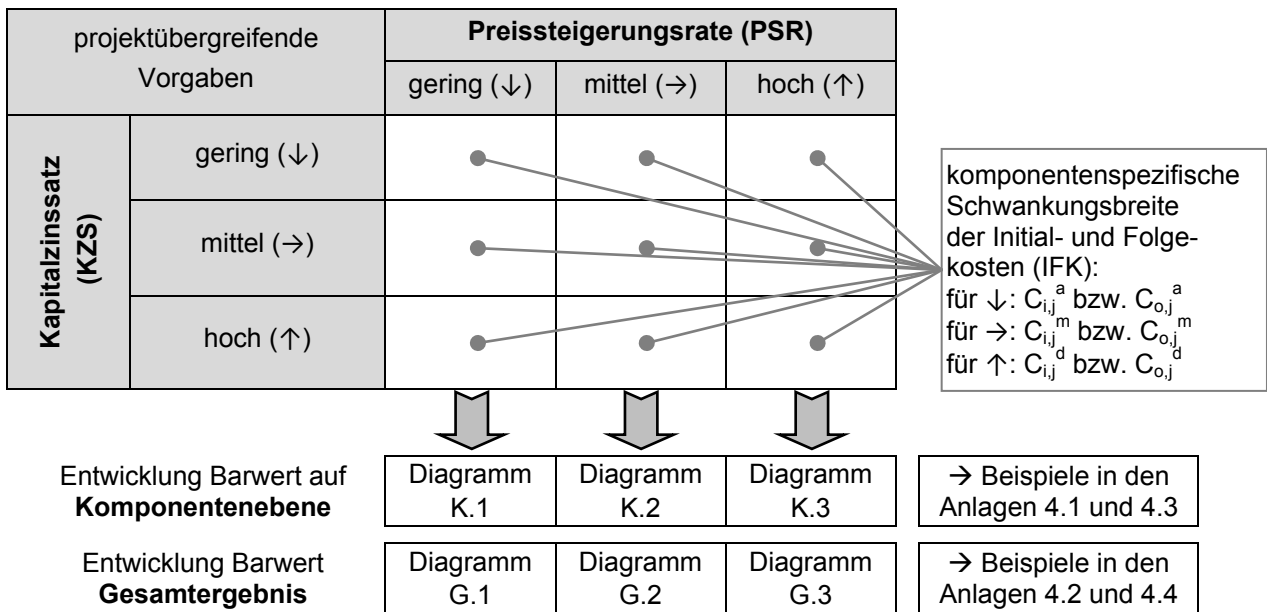


Abbildung 51: Gruppierung der Ergebnisdarstellung

Exemplarisch zeigt die Abbildung 52 die Barwertentwicklung eines nicht näher spezifizierten Diagramms der Kategorie K.2 (mittlere Preissteigerungsrate bzw. PSR →). Die in das Diagramm aufgenommene Legende zeigt die Kombinationen der Eingangsparameter nach der oben eingeführten Kurzschreibweise.

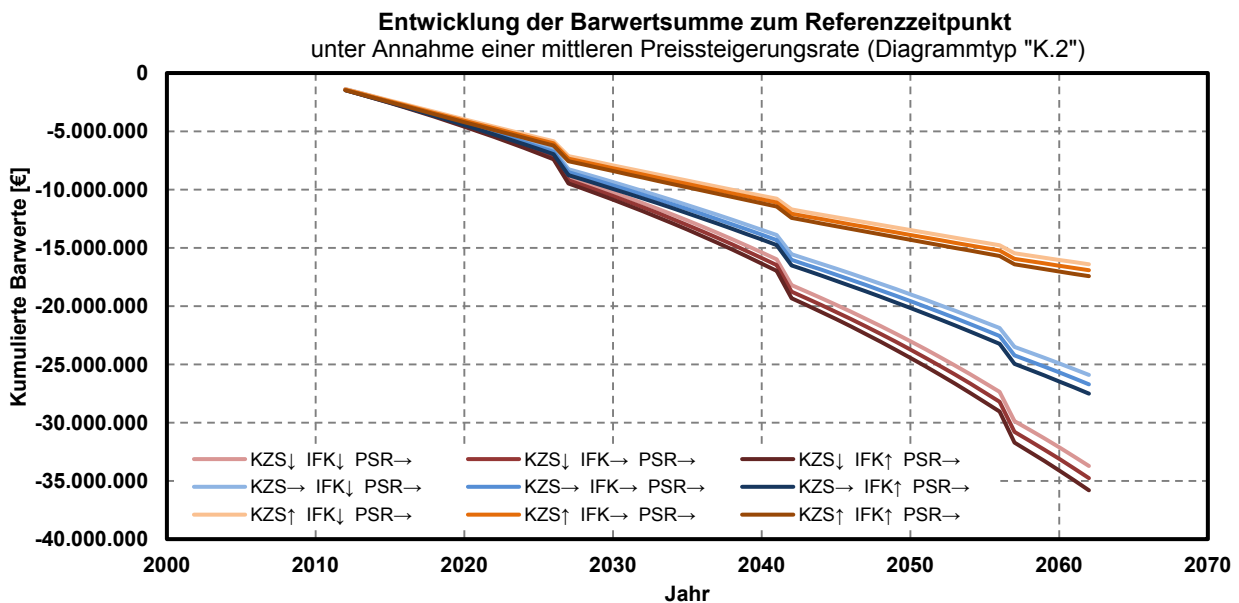


Abbildung 52: Barwertentwicklung für die in der Legende dargestellten Kombinationsmöglichkeiten

Eine weitergehende Interpretation der Berechnungsergebnisse wird durch den Folgekostenindex ausgedrückt. Der Folgekostenindex ist definiert als die Entwicklung der Barwertsumme der Folgekosten im Verhältnis zu den Initialkosten zum Referenzzeitpunkt. Anhand dieser Größe lässt sich eine Aussage dazu treffen, wie sich die Folgekosten im Verhältnis zu den Initialkosten entwickeln. In Abhängigkeit von der Höhe der Folgekosten können die Zeitpunkte bestimmt werden, zu denen die Folgekosten die Größenordnung der ein- oder mehrmaligen Initialkosten erreichen.

Der Folgekostenindex ist abhängig vom Kapitalzinssatz und von der Preissteigerungsrate. Nach der für die Barwertentwicklung erläuterten Systematik werden wiederum drei Diagramme pro Komponente bzw. zur

Interpretation des Gesamtergebnisses zur Verfügung gestellt. Für die in Abbildung 52 gezeigten Barwertverläufe stellt Abbildung 53 die korrespondierende zeitliche Entwicklung der Folgekostenindizes dar.

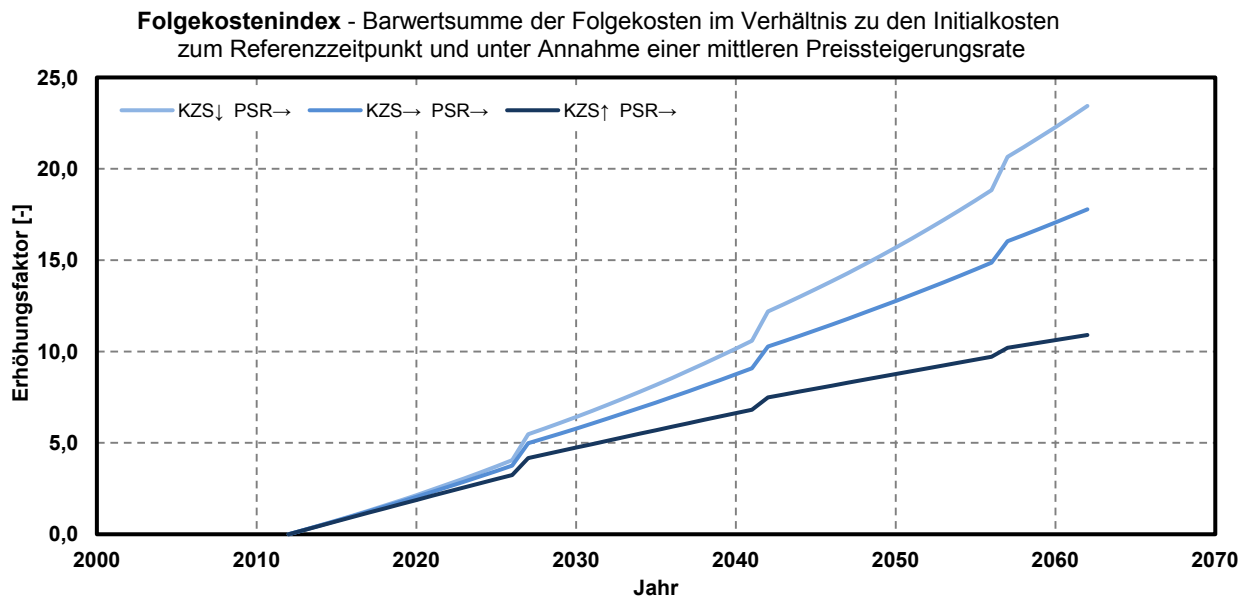


Abbildung 53: Entwicklung der Folgekostenindizes für das in Abbildung 52 gezeigte Beispiel

Es sei abschließend darauf hingewiesen, dass der Folgekostenindex die zuvor erläuterte Entwicklung des Barwertes ergänzt. Die vorteilhafte Variante ist auf Grundlage der errechneten Barwerte auszuwählen.

5.6 Modul OTLCC – Operational Tunnel Life-Cycle Costs

5.6.1 Anwendung

Das OTLCC-Instrument kommt zum Einsatz, wenn für das betrachtende Bauwerk detaillierte Informationen zur baulichen Durchbildung und zum bisherigen technischen und finanziellen Betriebsverlauf vorliegen. In der Regel erfüllen Tunnelbauwerke diese beiden Kriterien gleichzeitig, wenn sie zu einem früheren Zeitpunkt fertiggestellt wurden. Unter Hinzuziehung einer dokumentierten Datengrundlage (Datenhistorie) ist es dann möglich, die vollständige Beschreibung eines Tunnelbauwerks durch einzelne Komponenten vorzunehmen. Die Komponenten sind so zu wählen, dass sich die vorliegende Struktur und der Detaillierungsgrad der Kostenhistorie im Modell widerspiegeln. Liegen neben den in der Vergangenheit dokumentierten Kosten auch Angaben zum Ausfallverhalten einzelner Komponenten vor, kann zur Bestimmung der theoretischen Nutzungsdauer – falls die in Abschnitt 5.6.2 näher beschriebenen Rahmenbedingungen erfüllt sind – die Auswertung nach der Weibullverteilung zur Anwendung kommen.

Das wichtigste Ziel der OTLCC-Anwendung besteht darin, Prinzipien des Tunnelbetriebs unter der Nutzung von Synergieeffekten nachhaltig zu verändern. Dazu muss zunächst der Status quo der bisherigen Tunnelbewirtschaftung im Modell abgebildet werden. Das Status quo-Modell bildet die Vergleichsbasis für alle zu untersuchenden Alternativen. Die Anzahl der Alternativen ist unbegrenzt; sie dienen dazu, zukünftige alternative Bewirtschaftungsstrategien zu evaluieren. Alternativen zeichnen sich dadurch aus, dass sie

- denselben Zeithorizont wie das Status quo-Modell abbilden müssen.
- gegenüber dem Status quo eine geänderte Komponentenzusammenstellung aufweisen oder einzelne Eingangsparameter einer Komponente andere Werte aufweisen. Dennoch dürfen die Funktion und die Leistungsfähigkeit des Tunnels aus Vergleichbarkeitsgründen nicht von der Funktion des Status quo-Modells abweichen.

- ggf. mit Initialkosten verbunden sind. Diese drücken aus, dass gegenüber dem Status quo neue Komponenten berücksichtigt werden oder größere Instandsetzungsmaßnahmen Anwendung finden.
- einen identischen Referenzzeitpunkt besitzen. Beispielsweise kann dieser mit der Wiederinbetriebnahme eines Tunnels zusammenfallen.

Jede Alternative wird in einer gesonderten OTLCC-Datei bearbeitet und abgespeichert. Aus dem Ergebnisvergleich geht schließlich die bevorzugte Alternative hervor.

Nutzer des OTLCC-Tools können erneut die öffentliche Hand als auch Anbieter privater Betreiberleistungen sein. Für die öffentliche Hand, die über ihre Straßenbauämter ein großes Portfolio an Straßentunneln betreibt, besteht auf diese Weise die Möglichkeit, sukzessive den Bestand zu bewerten, Instandhaltungs- oder Nachrüstungskampagnen zu planen und finanzielle Planungssicherheit zu schaffen. So sollten Ausschreibungen für derartige Kampagnen ebenfalls auf einer Lebenszykluskostenanalyse beruhen und sehr konkrete Vorgaben zur Ausführung und ggf. zur Beschreibung der einzusetzenden Produkte beinhalten.

Besteht seitens der öffentlichen Hand die Absicht, einen Bestandstunnel in einen ÖPP-Streckenabschnitt zu integrieren, bietet die OTLCC-Anwendung Hilfestellung bei der Erstellung der Ausschreibungsunterlagen durch die Abbildung des Status quo. Auf der Seite des privaten Bieters stehen hingegen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Zusammenhang mit dem Studium von Varianten im Vordergrund. Unter Zugrundelegung von Betriebsdaten aus der Vergangenheit erfolgt die Errechnung der mit dem Bauwerk erzielbaren Rendite. Bei ÖPP-Projekten könnte darüber hinaus ein Mehrwert für den Konzessionsgeber damit verbunden sein, nach Ablauf der Konzessionsdauer die vom Konzessionsnehmer gepflegte Lebenszykluskosten-Datenbank zu übernehmen und somit die erprobte Bewirtschaftungsstrategie fortzuführen.

5.6.2 Aufbau und Umfang der Dateneingabe

Für die Berechnung der Lebenszykluskosten nach der OTLCC-Systematik kommt dasselbe Dateigrundgerüst wie für die PTLCC-Anwendung zum Einsatz. Jedoch unterscheidet sich die Berechnung in zwei wesentlichen Punkten: Einerseits besteht das Tunnelbauwerk bereits und kann detailliert durch die Wahl der Komponenten im Modell abgebildet werden, andererseits gibt die Betriebshistorie technische und monetäre Rahmenbedingungen vor. Die Dokumentation des Betriebs ermöglicht es, die Folgekosten mit einem höheren Maß an Genauigkeit zu prognostizieren. Würden im PTLCC-Modell die Folgekosten als Faktor der mit einer Schwankungsbreite ausgestatteten Initialkosten angesetzt, so kann nun unter einer gezielten Reduzierung der Schwankungsbreite eine optionale Unterteilung der Folgekosten in Energie- und Instandhaltungskosten erfolgen. Diese Differenzierung ist insbesondere für Komponenten von Vorteil, die mit einer hohen Leistungsaufnahme verbunden sind. Für Tunnelbauwerke betrifft dies beispielsweise die dauerhaft erforderliche Ausleuchtung der Fahrbahn, das Anfahren und Aufrechterhalten der Lüftung sowie das permanente Funktionieren der zentralen Leitnehmer. Die Instandhaltungsanteile fassen hingegen sämtliche Aufwendungen einer Komponente zusammen, die durch Inspektion, Wartung und Instandsetzung verursacht werden. Aus der Trennung zwischen Energie- und Instandhaltungskosten resultiert der Vorteil, dass für beide Anteile unterschiedliche Preissteigerungsfaktoren berücksichtigt werden können und diese für die Kostenfortschreibung voneinander entkoppelt sind. Darüber hinaus wird noch ein weiterer Schritt ermöglicht: Der durch den Betrieb einer Komponente hervorgerufene Abbau des Abnutzungsvorrats macht es eventuell erforderlich, Instandhaltungsaufwendungen mit einer Steigerung zu versehen. Durch die Angabe eines derartigen Steigerungsfaktors erfährt der Instandhaltungsaufwand zwischen der Inbetriebnahme und dem Austauschzeitpunkt einer Komponente eine lineare Erhöhung. Ein voranschreitender Abbau des Abnutzungsvorrates drückt sich etwa dadurch aus, dass Instandsetzungsmaßnahmen komplexer werden oder Ersatzteile zunehmend schwerer zu beschaffen sind.

Wie in Abbildung 49 gezeigt, zählen neben den Betriebs- und Funktionserhaltungskosten auch die Austauschkosten zu den Folgekosten einer Komponente. Wurde nach der PTLCC-Systematik davon ausgegangen, dass nach Ablauf der theoretischen Nutzungsdauer der komplette Austausch einer Komponente erforderlich wird, so kann nach dem OTLCC-Verständnis die Definition eines Austauschgrades für jeden Komponentenwechsel vorgenommen werden. Dieses Vorgehen bildet die Möglichkeit ab, Teile einer Komponente ohne deren Austausch weiter zu nutzen. Die Anwendbarkeit dieser Option ist davon abhängig, welche Anzahl an zusätzlichen Elementen zu einer Komponente hinzugerechnet wird. Elemente einer Komponente, die zu einer Reduzierung des Austauschgrades führen können, sind beispielsweise Kabelzuelegungen, Aufhängungen oder Schutzgehäuse.

Im Hinblick auf die Abbildung eines Bestandstunnels in einem OTLCC-Modell bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten, die im Folgenden vorgestellt werden sollen. Diese beiden Möglichkeiten betreffen den Umgang mit den Initialkosten und erfordern die Festlegung unterschiedlicher Referenzzeitpunkte. Im ersten Fall ist der Referenzzeitpunkt identisch mit der Erstinbetriebnahme des Tunnelbauwerks. Daraus resultiert, dass es sich bei den Initial- und einem Teil der Folgekosten um Ist-Kosten handelt. Da die Lebenszykluskostenanalyse für Bestandbauwerke in der Regel mit einem Wechsel der Betriebsphilosophie verbunden ist, haben die Folgekosten nach dem Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme den Charakter einer Kostenfortschreibung. Erscheint dieser erste Fall aufgrund der Handhabung und der Abbildung der Kosten im Modell zunächst einfach, so sind mit dieser Lösung aber auch Nachteile verbunden: Die aus der Analyse hervorgehenden Kapitalkosten beinhalten Anteile, die bereits in der Vergangenheit angefallen sind und historischen Stellenwert haben. Hieraus leitet sich die sofortige Konsequenz ab, dass die berechneten Kapitalwerte nur eine Vorteilhaftigkeit zwischen einzelnen Alternativen zum Ausdruck bringen, aber keinesfalls eine Lebenszykluskostenberechnung ab dem Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme darstellen. Um eine „echte“ Berechnung der Lebenszykluskosten handelt es sich hingegen dann, wenn der Referenzzeitpunkt mit der Wiederinbetriebnahme des Tunnels zusammenfällt. Hierbei ist zu beachten, dass die Initialkosten bereits bestehender Komponenten monetär nicht abzubilden sind, vielmehr sind die Folgekosten einmalig zum Referenzzeitpunkt als Initialkosten anzugeben und unter Zuhilfenahme der entsprechenden Faktoren als Folgekosten fortzuschreiben. Die Höhe der Initial- und Folgekosten sind auf Grundlage der Betriebshistorie zu ermitteln und in das Modell zu implementieren. Bei Komponenten, die zum Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme erstmalig zum Einsatz kommen, ist der reguläre Verfahrensablauf anzuwenden; dies bedeutet, dass sich die Initialkosten auf den Referenzzeitpunkt beziehen und aus ihnen die Folgekosten abgeleitet werden. Mit der Anwendung des zweiten Falls ist der Vorteil verbunden, dass die wirklichen Lebenszykluskosten berechnet werden und auf diese Weise gegenüber dem Investor der Umfang der erforderlichen Geldbeschaffung zum Ausdruck gebracht wird.

Neben der Konkretisierung der Kostenseite vermittelt eine Betriebshistorie auch wichtige Informationen zum Ausfallverhalten der verschiedenen in einem Tunnel verbauten Komponenten. Derartige Daten können dazu herangezogen werden, die theoretische Nutzungsdauer nach der in Abschnitt 4.4.5.2 aufgezeigten Systematik zu spezifizieren. Wie ebenfalls in Abschnitt 4.4.5.2 anhand der Schritte 1 bis 4 aufgezeigt wird, eignet sich insbesondere die Weibullverteilung dazu, das Ausfallverhalten einer technischen Komponente abzubilden. Für die folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass für baugleiche Komponenten eine Dokumentation von Zeitpunkten vorliegt, zu denen der irreparable Ausfall eingetreten ist. Unter Einhaltung der Schritte 1 bis 4 erfolgt dann die Ermittlung der Parameter b und T für die zweiparametrische Weibullverteilung. Im Weiteren muss der Anwender nach Fall 2 der in Abbildung 42 dargestellten Systematik zur Ermittlung einer angemessenen Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$ den Stellenwert der Komponente festlegen. Der Zeitpunkt t , der dieser Ausfallwahrscheinlichkeit zugeordnet ist, entspricht der für die Komponente gesuchten theoretischen Nutzungsdauer. Um diesen Wert zu ermitteln, muss die Ausfallwahrscheinlichkeitsfunktion für die zweiparametrische Weibullverteilung (Formel 4.6 in Abschnitt 4.4.5.2) nach der Größe t wie folgt aufgelöst werden:

$$\begin{aligned}
 \text{Ausfallwahrscheinlichkeit: } F(t) &= 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \\
 \Leftrightarrow (1 - F(t)) &= e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b} \\
 \Leftrightarrow -\ln(1 - F(t)) &= \left(\frac{t}{T}\right)^b \\
 \Leftrightarrow b = \log\left(\frac{t}{T}\right) * (-\ln(1 - F(t))) \\
 \Leftrightarrow b &= \frac{\ln(-\ln(1 - F(t)))}{\ln\left(\frac{t}{T}\right)} \\
 \Leftrightarrow \ln\left(\frac{t}{T}\right) &= \frac{\ln(-\ln(1 - F(t)))}{b} \quad (\text{Formel 5.9})
 \end{aligned}$$

Schließlich ergibt sich die zur gewählten Ausfallwahrscheinlichkeit korrespondierende theoretische Nutzungsdauer t zu:

$$t = T * e^{\left[\frac{\ln(-\ln(1 - F(t)))}{b}\right]} \quad (\text{Formel 5.10})$$

Die für die einzelnen Komponenten ermittelten theoretischen Nutzungsdauern sind in die entsprechenden Komponenten-Modultabellen zu integrieren. Sollten weitergehende Überlegungen dazu führen, dass für dieselbe Komponente auch andere theoretische Nutzungsdauern in Betracht zu ziehen sind, so sind diese Annahmen als alternative Lösungswege anzusehen und im Rahmen weiterer Lebenszykluskostenanalysen zu untersuchen.

5.6.3 Berechnungsergebnisse und deren Interpretation

Im Vergleich zum PTLCC-Instrument gehen in die OTLCC-Anwendung Werte mit wesentlich geringeren Schwankungsbreiten bezüglich der Unsicherheit der Initial- und Folgekosten ein. Die Kostenhistorie lässt es zu, die realen Kosten den Entstehungsjahren zuzuordnen und komponentenspezifische Preissteigerungsfaktoren zu ermitteln. Unter zeitgleicher Beachtung der in statistischen Zeitreihen enthaltenden Entwicklungen besteht hier die Möglichkeit, einen mittleren Wert anzugeben sowie die oberen und unteren Grenzbereiche so weit wie möglich einzuschränken.

Da die Zinssatzentwicklung unabhängig vom Bauwerk ist, können Unsicherheiten, die aus der Festlegung des Kapitalzinssatzes resultieren, durch Kostenhistorien nicht weiter konkretisiert werden. Bezüglich der Wahl von Kapitalzinssätzen sollte auf das in Abschnitt 4.4.5.4 beschriebene Vorgehen zurückgegriffen werden.

Wie in Abschnitt 5.6.2 aufgezeigt, kann der Umgang mit dem Referenzzeitpunkt auf zwei Arten erfolgen. In Abhängigkeit vom gewählten Ansatz sind die Berechnungsergebnisse wie folgt zu interpretieren:

- Für den ersten Fall, bei dem der Referenzzeitpunkt dem Zeitpunkt der Erstinbetriebnahme des Tunnelbauwerks entspricht, werden durch die Diskontierung von Zahlungen, die sich aus zeitlicher Sicht weiter vom Referenzzeitpunkt entfernen, zunehmend von der Gewichtung her vernachlässigt. Diese Tatsache hat zur Folge, dass der berechnete Kapitalwert keinesfalls stellvertretend für die Größenordnung der Lebenszykluskosten zum Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme angesehen werden darf. Die Höhe des Kapitalwerts darf hierbei lediglich zu Vergleichszwecken zwischen einzelnen Alternativen herangezogen werden.
- Im zweiten Fall fällt der Referenzzeitpunkt mit dem Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme des Tunnels zusammen. Es handelt sich hierbei um eine „wirkliche“ Lebenszykluskostenanalyse, der Kapitalwert hat

nicht nur vergleichenden Charakter, sondern auch mit seinem Absolutwert geht eine wichtige Aussage einher.

Desweiteren wird auf die Ausführungen zur Ergebnisinterpretation der PTLCC-Anwendung (Abschnitt 5.5.3) und insbesondere auf die Abbildung 51 und die damit einhergehenden Erläuterungen verwiesen. Zusammenfassend bleibt jedoch festzuhalten, dass die OTLCC-Anwendung aufgrund ihrer Detailschärfe eine höhere Robustheit als die PTLCC-Systematik aufweist.

Die Arbeitsweise des OTLCC-Instruments wird im Detail in Kapitel 6 erläutert. Dazu wird für einen Modelltunnel die Lebenszykluskostenanalyse exemplarisch durchgeführt.

6 Anwendungsbeispiel: Die Lebenszykluskostenanalyse eines Bestandstunnels

6.1 Zielstellung und Vorgehen

Um einer interessierten Anwendergruppe die Handhabung des im vorhergehenden Kapitel Schritt für Schritt entwickelten EXCEL-Tools zu verdeutlichen, beinhaltet dieses Kapitel die Prozessbeschreibung der Lebenszykluskostenanalyse für einen beispielhaft gewählten Modelltunnel. Beim Modelltunnel handelt es sich um ein fiktives Bauwerk, welches im Jahr 1995 für den Verkehr freigegeben wurde. Eine Nachrüstungskampagne, deren dreimonatige Ausführungsphase für die Mitte des Jahres 2012 anvisiert ist, hat bereits ein fortgeschrittenes Planungsstadium erreicht. Mit der Nachrüstungskampagne wird das Ziel verfolgt, das in gültigen Richtlinien beschriebene Sicherheitsniveau in vollem Umfang umzusetzen sowie der durch den Bauwerksbetrieb entstandenen Abnutzung mit geeigneten Instandhaltungsmaßnahmen entgegenzuwirken. Um den finanziellen Aufwand der Maßnahme zu planen und einen langfristig effizienten Betrieb des Tunnels zu gewährleisten, bildet der Betreiber das Bauwerk in einem Lebenszyklusmodell ab. Mit dieser Entscheidung geht die Forderung einher, die bisherige Entwicklung des Bauwerks zu rekapitulieren und auf diesen Erfahrungsschatz für die Planung zukünftiger Maßnahmen zurückzugreifen.

In Abschnitt 6.2 soll der Modelltunnel zunächst so detailliert beschrieben werden, wie es für die Anwendung des Berechnungstools erforderlich ist. Dazu gehören einerseits die Angaben zum Bauwerksbestand vor Durchführung der Verbesserungsmaßnahmen sowie andererseits Konkretisierungen zum geplanten Nachrüstungs- und Instandhaltungsumfang. Für beide Konstellationen – dem derzeitigen Bestand und dem zukünftigen Ausstattungsniveau des Tunnels – müssen die jeweils erforderlichen Bauteile und Komponenten zusammengestellt werden (Abschnitt 6.3). Insbesondere die bisher für das Tunnelbauwerk dokumentierten Betriebsdaten ermöglichen es, das Komponentenverhalten mit einem hohen Maß an Genauigkeit zu prognostizieren. Aus den bisher erfassten Daten lassen sich für die einzelnen Komponenten neben den Initial- auch die Folgekosten für den Betrieb und die Instandhaltung sowie für bereits zu einem früheren Zeitpunkt ausgetauschte Komponenten technischen Nutzungsdauern ableiten. Eine derartige Datengrundlage bildet das Fundament für die Fortschreibung zukünftiger technischer und monetärer Daten.

Aus der einleitenden Darstellung wird ersichtlich, dass infolge des hohen Detaillierungsgrades für den zu untersuchenden Bestandstunnel das in Abschnitt 5.6 beschriebene OTLCC-Modul zur Anwendung kommt. Eine schrittweise Beschreibung und Aufstellung des Analysemodells sowie die Berechnung der Lebenszykluskosten für den Modelltunnel beinhalten die Abschnitte 6.4 und 6.5. Die erarbeiteten Berechnungsmodelle sind in den Dateien *LZK_Analyse_M-tunnel_1995.xlsx* und *LZK_Analyse_M-tunnel_2012.xlsx* hinterlegt. Diese Dateien sind als gegenwärtige Zwischenergebnisse anzusehen und bilden das Grundgerüst zur Eingabe weiterer Daten und somit zur Fortschreibung der Lebenszykluskostenanalyse für den Modelltunnel. An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass die Aufstellung eines Lebenszyklusmodells – unabhängig davon, ob das PTLCC- oder das OTLCC-Instrument zur Ausführung kommt – stets auf die Datei mit der Bezeichnung *Basis_LZK_Analyse.xlsx* aufbaut.

6.2 Beschreibung des Modelltunnels

6.2.1 Allgemeine Angaben

Beim gewählten Modellbauwerk handelt es sich um einen Gegenverkehrstunnel mit einer Spur je Fahrtrichtung. Der Tunnel ist Bestandteil einer von West nach Ost verlaufenden Bundesstraße und wurde in einer dünnbesiedelten Region erbaut. Die in bergmännischer Bauweise vorgetriebene Röhre besitzt eine Gesamtlänge von 1.470 m und durchörtert einen Höhenzug aus überwiegend standfestem Gebirge. Die Tunnelachse verläuft gradlinig, die Fahrbahn weist eine konstante Neigung von 1,2 % auf. In einem Abstand von 620 m

zum Westportal weist die Gebirgsüberdeckung oberhalb des Tunnelscheitels ihren maximalen Wert von 155 m auf.

Von jedem Standort im Tunnel ist in einer Notfallsituation in einer Entfernung von maximal 150 m der Zugang zu einem Notausgang oder zu einem der beiden Tunnelportale zu erreichen. Wie der in Abbildung 54 dargestellte Grundriss zeigt, sind jeweils zwei benachbarte Notausgänge über einen begehbaren Stollen miteinander verbunden und an ein Schachtbauwerk angeschlossen. Insgesamt existieren zwei Schächte, die mit Treppenanlagen und Lastaufzügen ausgestattet sind und ins Freie führen. In die Schacht- und die zugehörigen Notausgangsgebäude wurden Betriebsräume sowie in den östlichen Schacht die Tunnelleitwarte integriert. Der im westlichen Teil angeordnete Schacht weist zwischen der Geländeoberkante und der Schachtsohle eine Teufe von 85 m, der östliche Schacht einen korrespondierenden Wert von 48 m auf.

Aus der Abbildung 54 gehen neben den geometrischen Eigenschaften des Tunnels weitergehende Informationen hervor, die in diesem und im nächsten Abschnitt noch näher thematisiert werden.

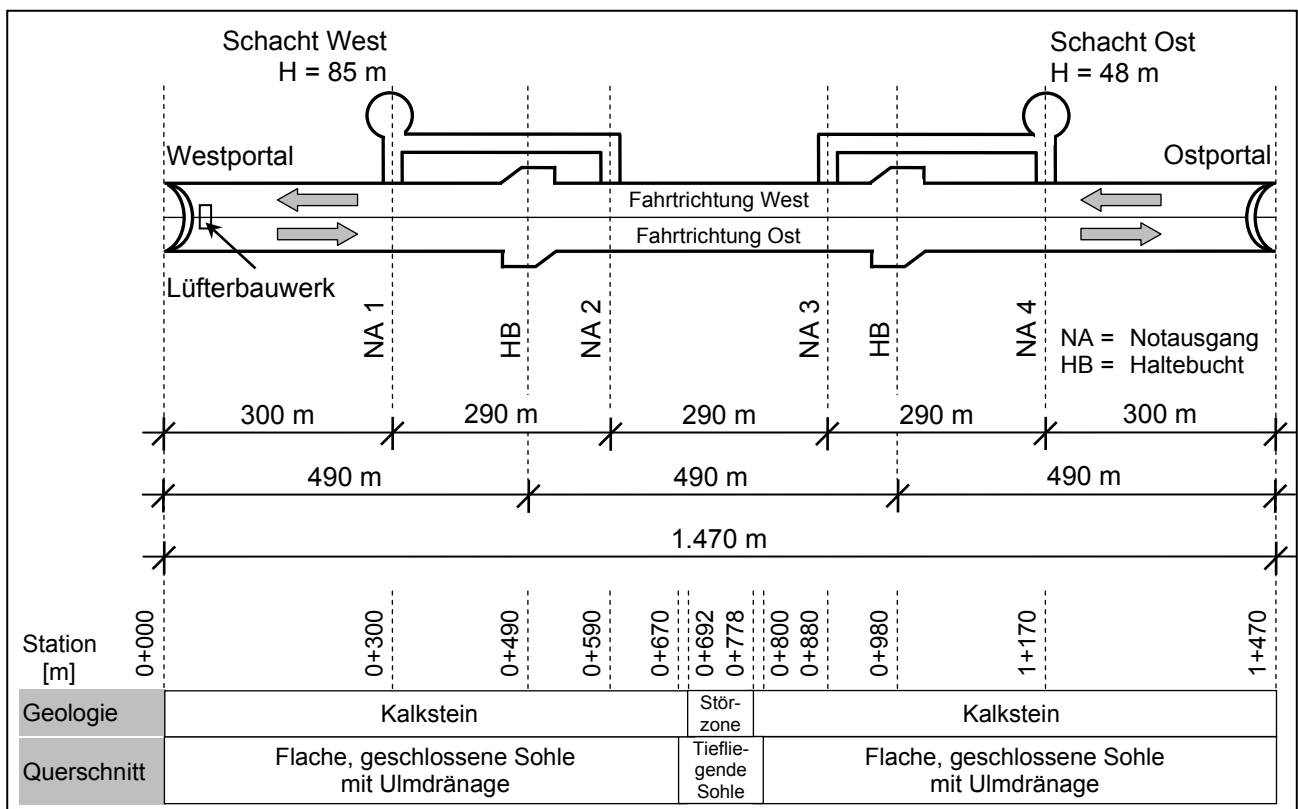


Abbildung 54: Grundriss Modelltunnel (nicht maßstäblich)

Die Gebirgsgeologie zeichnet sich durch wenig bis mäßig stark geklüfteten Kalkstein aus. Etwa auf halber Tunnelstrecke wird eine geologische Störzone durchfahren, die auf der Höhenlage des Tunnels in Längsrichtung eine Mächtigkeit von 86 m aufweist. Über die gesamte Länge befindet sich das Bauwerk oberhalb des Grundwasserspiegels, die Klüfte im Hartgestein führen jedoch in Abhängigkeit von der Niederschlagsmenge temporär Sickerwasser. Durch Auswaschungserscheinungen haben sich im Kalkstein bereichsweise kleinere Karsthohlräume gebildet.

Zwischen Mai 1993 und April 1994 erfolgte der Ausbruch des Tunnels, der Stollen sowie der Schächte unter Anwendung eines kombinierten Bagger-/Sprengvortriebs. Für die Abschnitte, in denen der Kalkstein dominiert, konnte aufgrund der hohen Gesteinsfestigkeit ein Ausbruchquerschnitt mit einer flachen Sohlform gewählt werden. Dabei handelt es sich um den in Bild 5.1.7 der ZTV-ING [19] dargestellten Gewölbequerschnitt mit geschlossener Sohle. In der geologischen Störzone wurde hingegen durch die statische Bemess-

sung gefordert, den in Bild 5.1.6 der ZTV-ING dargestellten Gewölbequerschnitt mit tieferliegender geschlossener Sohle auszuführen.

Abgesehen von Gründen, die aus der statischen Erfordernis resultieren, ist die endgültige Festlegung der Tunnelausbruchfläche durch die Wahl des erforderlichen Straßenquerschnitts beeinflusst. Für den im Gegenverkehr betriebenen Modelltunnel kommt der in Bild 1 der RABT [72] dargestellte Regelquerschnitt 10,5 T ohne Seitenstreifen zum Einsatz. Dieser Querschnitt besitzt eine Fahrbahnbreite von 3,50 m, beidseitig befindet sich ein Randweg mit 1,0 m Breite. Zwischen der Fahrbahn und dem baulich erhöhten Randweg existiert ein 25 cm breiter Begrenzungsstreifen. Da aufgrund der verkehrlichen Rahmenbedingungen die Anordnung eines separaten Standstreifens entbehrlich ist, verfügt der Tunnel je Fahrtrichtung über zwei Nothaltebuchten. Diese sind, wie Abbildung 54 zeigt, gegenüberliegend positioniert und jeweils 40 m lang. Die gegenüberliegende Anordnung ermöglicht das Wenden von Einsatz- und Rettungsfahrzeugen.

Die Bau- und Ausstattungskosten (Initialkosten) summierten sich zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme des Modelltunnels im Jahr 1995 auf insgesamt 38,6 Mio €. An dieser Stelle sei der Hinweis gegeben, dass für die Kostenberechnungen ausschließlich EURO-Beträge zur Anwendung kommen. Umrechnung zwischen Deutscher Mark und EURO sind unter dem Ansatz des offiziellen Wechselkurses erfolgt.

6.2.2 Bestand

Zunächst soll die Erstellung des Tunnelrohbaus unter Aufführung der wichtigsten zur Anwendung gekommenen Baustoffe und Verfahren zusammengefasst werden. Die Beschreibungen stützen sich im Wesentlichen auf die in der ZTV-ING [19] dargestellten Vorgaben und Methoden.

Unmittelbar nach Ausbruch des Hohlraums im kombinierten Bagger- und Sprengvortrieb erfolgte der Einbau der Außenschale unter Verwendung von Spritzbeton, Ausbaubögen und Betonstahlmatten. Um Nachbrüchigkeiten zu unterbinden und die vorläufige Gebirgssicherung zu stabilisieren, wurden nach örtlicher Notwendigkeit auch Spieße und Gebirgsanker in den umliegenden Baugrund eingetrieben. Darüber hinaus machte der Vortrieb in der Störzone die Verwendung weiterer, teilweise vorauseilender Sicherungsmaßnahmen erforderlich. Auf die abschnittsweise Fertigstellung der Außenschale folgte die Aufbringung des Abdichtungsträgers als separate, mindestens 3 cm dicke Spritzbetonschicht mit einem Größtkorndurchmesser von 8 mm. Um einer Zerstörung der gegen Bergwasser abdichtenden Kunststoffbahn entgegenzuwirken, ist zwischen Abdichtungsträger und Kunststofflage eine Schutzschicht aus Geotextil mit einem Flächengewicht von 50 g/m² eingebaut worden.

Im Hinblick auf die gewählte Abdichtungssystematik ist über die gesamte Tunnellänge zwischen zwei verschiedenen Ausführungsvarianten zu unterscheiden. Maßgeblich wird die Konfiguration der Abdichtung durch die geologische Beschaffenheit des Baugrundes bestimmt. Während in den Abschnitten mit kalksteinigem Baugrund die in der ZTV-ING definierte Regenschirmabdichtung des Tunnelgewölbes in Kombination mit einer beidseitig im unteren Flankenbereich – der sogenannten Ulm – angeordneten Bergwasserdränage zum Einsatz kommt, ist der Ausbruchquerschnitt in der Störzone entlang des gesamten Querschnittsumfanges durch den Einbau einer Kunststofflage gegen Wasser abgedichtet. In Abschnitten, die mit einer Ulmdränage ausgestattet sind, sickert das Bergwasser unter bereichsweisem Einbau von Noppenbahnen den geschlitzten Dränagerohren zu und verhindert somit den Aufstau eines auf die Tunnelschale wirkenden Wasserdruckes. Das gesammelte Bergwasser fließt mit dem Tunnelgefälle in Richtung Ostportal, wo die Einleitung in einen Vorfluter erfolgt. Durch den vollständig abgedichteten Abschnitt der Störzone wird das oberstrom gefasste Bergwasser in Vollwandrohren hindurch geleitet.

Die Innenschale ist getrennt nach Sohle und Gewölbe in Blöcken von 10 m Länge aus Stahlbeton mit einer Mindestschalendicke von 35 cm gefertigt. In Abschnitten mit einer Ulmdränage ist die Dimensionierung der Innenschale ohne Ansatz von Wasserdrücken erfolgt, im undrännierten Bereich sind hingegen Belastungen

aus Sickerwasser berücksichtigt worden. Um die etwaige Ausbreitung von Wasser für den Fall einer Folienundichtigkeit im undrännierten Abschnitt auf eine Blocklänge zu begrenzen, befinden sich über den gesamten Querschnittsumfang in der Blockfuge außenliegende, aus Polyethylen gefertigte Fugenbänder. Das Fugenband ist mehrreihig mit Sperrankern ausgestattet und geht während der Betonage einen Verbund mit dem Innenschalenbeton ein. Um Undichtigkeiten zu verschließen, die zu einem späteren Zeitpunkt auftreten können, sind die zwischen den Sperrankern eingebauten Schläuche mit einer Dichtflüssigkeit zu verpressen.

In vergleichbarer Bauweise sind die Notausgangsschleusen, -stollen und -schächte erstellt worden. Aufgrund geringerer Querschnittsabmessungen wurde dort die Bauverfahrenstechnik gegenüber der Situation im Haupttunnel modifiziert. Darüber hinaus wurden sämtliche, unterhalb der Geländeoberkante befindliche Notausgangsbauwerke mit einer um den gesamten Umfang geführten Abdichtungssystematik ausgestattet.

Über die gesamte Länge der Hauptröhre wurde eine Zwischendecke aus Stahlbeton-Fertigteilen installiert. Die Auflagerung der Fertigteile erfolgte auf die mit der Innenschalenbetonage hergestellten Konsolen. Der über der Fertigteildecke befindliche Kanal dient der Zuführung von Frischluft bzw. der Abführung von Abluft, beispielsweise von Rauch im Brandfall. In regelmäßigen Abständen befinden sich Öffnungen in der Zwischendecke, die mit elektrisch betriebenen Lüftungsklappen ausgestattet sind. Hierdurch wird der Eintrag von Frischluft bzw. das Absaugen von Rauch oder Gasen in Abhängigkeit von der Position im Haupttunnel möglich. Unmittelbar hinter dem Westportal bei Station 0+050 m (Achse) mündet der Lüftungskanal in ein senkrecht geführtes, schornsteinartiges Bauwerk. Hierin sind zwei leistungsfähige Ventilatoren installiert, die im Saug- und Druckmodus betrieben werden können.

Zur Ableitung von Wasser, das Fahrzeuge in den Tunnel hineintragen oder das durch das Löschen im Brandfall entsteht, ist einseitig der Fahrbahn in den Begrenzungsstreifen eine Schlitzrinne integriert. Die Schlitzrinne entwässert in Richtung des Tunnelgefälles. Die im Tunnel gefassten Flüssigkeiten fließen einem Speicherbecken zu, welches nach Erfordernis über einen Saugwagen zu entleeren ist. Die beidseitig der Asphaltfahrbahn vorhandenen und baulich erhöhten Randwege beinhalten Leerrohre und Kabelzugschächte sowie eine Löschwasserleitung mit Anschlüssen an Feuerwehrrhydranten, die sich im Abstand von 150 m befinden. Zwei 72 m³ fassende Speicherbecken am West- bzw. Ostportal sind über ein Pumpenhaus an die Löschwasserleitung angeschlossen. Da es sich um eine Nasslöschleitung handelt, bei der die Rohrleitung ständig gefüllt ist und ein geringer Überdruck aufrecht erhalten wird, kann durch das Öffnen eines Schiebers am Hydranten unmittelbar mit der Brandbekämpfung begonnen werden. Einen Zugang zu den Rohrleitungen der Ulmendränge wird durch Revisionsschächte geschaffen, die in Abständen von maximal 100 m im Randwegbereich angeordnet sind. Sämtliche Schächte sind mit Betonfertigteilen abgedeckt und können im Inspektionsfall von zwei Personen geöffnet werden.

Nach Abschluss der Rohbauarbeiten ist der Tunnel mit den in Tabelle 18 aufgeführten Bauteilen der verschiedenen Funktionsebenen ausgestattet worden. Dabei entspricht die Art der Ausstattung dem zum Zeitpunkt der Bauwerksplanung geforderten Umfang. Die Differenz zwischen dem damaligen und dem im Jahr 2012 geforderten Ausrüstungsstandard für den Modelltunnel ergibt sich aus dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Nachrüstungsbedarf.

6.2.3 Nachrüstungs- und Sanierungsbedarf

Die Vorgaben der für das Jahr 2012 anvisierten Nachrüstungsmaßnahmen ergeben sich aus dem in den aktuellen RABT [72] enthaltenen Standard zur sicherheitstechnischen Ausrüstung von Straßentunneln in Deutschland. Obgleich der betrachtete Modelltunnel nicht Teil des transeuropäischen Straßennetzes ist und somit nicht dem Geltungsbereich der RABT unterliegt, hat sich der Betreiber dennoch dazu entschieden, ein vergleichbares Sicherheitsniveau zu schaffen; dieses orientiert sich im Wesentlichen an den RABT. Die Nachrüstungsmaßnahmen werden als Anlass genommen, die übrigen Komponenten im Tunnel einer inten-

siven Wartung zu unterziehen, Verschleißteile und abgenutzte Komponenten auszutauschen sowie sämtliche Betonoberflächen zu reinigen, unter betontechnologischen Gesichtspunkten zu begutachten und ggf. Sanierungsarbeiten durchzuführen.

Die Umsetzung der Gesamtmaßnahme erfolgt während einer dreimonatigen Arbeitsphase, die durch zwei Hauptstufen gekennzeichnet ist: Während der ersten, einmonatigen Phase wird der Tunnel komplett gesperrt. Der Zeitraum wurde so gewählt, dass er mit den Schulsommerferien zusammenfällt. In der daran anschließenden zweiten Phase steht der Tunnel für weitere zwei Monate nur montags bis freitags von 5 bis 19 Uhr zur Verfügung. Während der Voll- bzw. Teilsperrophase wird der Verkehr in offener Streckenführung über den Höhenrücken umgeleitet. Pro Fahrtrichtung beträgt der Mehrreiseweg 5,2 km. Insbesondere während der Vollsperrungsphase sind in den Hauptverkehrszeiten aufgrund langsamer Lkws in den Steigungs- und Kurvenabschnitten Behinderungen zu erwarten. Eine Zunahme des Verkehrs durch touristische Fahrten wird hingegen nur in sehr geringem Maße prognostiziert. Um eine Kapazitätssteigerung der Umleitungsstrecke zu erreichen, werden Vorfahrtsregelungen temporär verändert.

Während der ersten Phase werden die Arbeiten im Tunnel durchgeführt, die eine kontinuierliche Umsetzung erfordern und keine intermittierende Verkehrsfreigabe erlauben. Zur intensiven Reinigung und Begutachtung sämtlicher Betonoberflächen wird ein Rollgerüst errichtet, von dessen Zwischenbühnen aus der Beton bearbeitet werden kann und erforderlichenfalls das Aufbringen von kunststoffmodifiziertem Sanierungsmörtel erfolgt. Zudem sind in zwei Blockfugen, in denen sich seit einigen Jahren Undichtigkeiten abgezeichnet haben, die zwischen den Sperrankern der Fugenbänder eingebauten Verpressschläuche mit Kunstharzen abzudichten. Mit einem Hochdruckspülfahrzeug werden überdies die beiden Stränge der Ulmdränge gereinigt und der Erfolg abschließend per Videodokumentation nachgewiesen. Vorbereitende Arbeiten zur Installation zusätzlicher elektrischer Komponenten werden ebenfalls in dieser ersten Phase getroffen. Diese Arbeiten zeichnen sich durch die Verlegung zusätzlicher Kabel in bereits vorhandenen Leerrohren bzw. durch die Herstellung von Wanddurchbrüchen aus. In Bereichen, in denen die Betonsanierung abgeschlossen ist, werden bereits Konsolen bzw. Aufhängungen zur Installation zusätzlich erforderlicher Komponenten installiert. Vor Abschluss der ersten Hauptphase wird die obere Asphaltsschicht auf der gesamten Tunnellänge abgefräst und eine neue Deckschicht eingebracht. Vor Beginn der zweiten Arbeitsphase wird die Straßenmarkierung aufgetragen, die Schlitzrinne und die daran angebotenen Dränagehaltungen gereinigt sowie eine umfassende Prüfung bereits ausgetauschter oder im Folgenden noch auszutauschender Komponenten durchgeführt.

Die zweite Hauptphase ist durch das regelmäßige Wechselspiel von Tunnelbetrieb und Installationsarbeiten geprägt. Nach jeder Arbeitsphase muss das Baufeld geräumt und ein Funktionscheck durchgeführt werden. Erst nach Abschluss dieser Vorleistungen kann der Tunnel wieder für den Verkehr freigegeben werden.

Im Einzelnen stellt sich der Nachrüstungsbedarf für den Modelltunnel wie folgt dar: Außerhalb des Tunnels ist zunächst eine automatisch einzuschwenkende Schrankenanlage mit Leuchtsignalisierung in beiden Portalzulaufstrecken zu installieren. Diese Anlage ermöglicht die effektive Abschottung der Tunnelröhre im Ereignisfall und das Zuströmen weiterer Fahrzeuge in den potenziellen Gefahrenbereich. Damit die Schrankenschließung überwacht werden kann, muss im Vorportalbereich die Nachrüstung einer Videoüberwachungsanlage erfolgen. Eine lückenlose Überwachung über die gesamte Tunnellänge von der Leitstelle aus wird gewährleistet, indem bereits vorhandene Kamerastandorte durch weitere ergänzt werden. Um darüber hinaus die unmittelbar nach Auftreten eines Gefahrenereignisses einsetzende Selbstrettungsphase der Tunnelnutzer zu unterstützen, werden einseitig an der Tunnelwandung in einer Höhe von 1 m über dem Randweg und in Abständen von 25 m hinterleuchtete Wegweiser positioniert. Diese zeigen ein weiß/grünes Fluchtwegpiktogramm, welches durch Entfernungangaben zur Erreichung eines Notausganges in Ost- bzw. Westrichtung ergänzt wird. Auch die Zugänge zu den Notausgängen werden durch eine grüne Beschichtung sowie durch eine mit LED-Technik ausgestattete Einfassung optisch deutlicher als bisher hervorgehoben.

Der Einbau von LEDs im Randweg unmittelbar neben der Spurbegrenzungslinie soll als weitere Maßnahme den Fahrzeugführer dabei unterstützen, seine Fahrspur zu halten und Seitenabstände besser abschätzen zu können. Die durchgezogene Mittellinie wird als Doppellinie ausgeführt und mit Reflektorknöpfen bestückt. Die perforierte Ausführung der durchgezogenen Linien führt zudem dazu, dass der Fahrer beim Überrollen deutliche Vibrationen wahrnimmt und in seine Spur zurückkehrt.

Über die zuvor beschriebenen Arbeiten hinaus werden auf der gesamten Haupttunnellänge die Linienbrandmeldekabel durch neuwertige Produkte ersetzt, die Notruftkabinen ausgetauscht, technisch weiterentwickelte Lautsprecher montiert und sämtliche Leuchten erneuert. Die in die Zwischendecke eingebauten Lüftungsklappen werden gereinigt, ihre Dichtigkeit überprüft sowie der elektrische Antrieb der in die Lüftungsklappen eingelassenen Lamellen kontrolliert. Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass bei diesem Gewerk ein gravierender Austauschbedarf besteht, da die letzte turnusmäßige Begehung des Lüftungskanals keine augenscheinlichen Abnutzungsspuren zutage gebracht hat. Gleiches gilt für die Ventilatoren, die gereinigt und einem Funktionscheck unterzogen werden. Darüber hinaus werden die im Tunnel vorhandenen Messgeräte deinstalliert, getestet und gewartet bzw. nach Erfordernis durch neue Geräte ersetzt. Während der ersten Hauptphase wird im Betriebsgebäude ein neuer Leitreechner in Betrieb genommen und an die Automatisierungsebene angebunden.

6.3 Ableitung der modellspezifischen Eingangsparameter

6.3.1 Technische Parameter – Bauteile und Komponenten

Beispielhaft soll zunächst das Ausfallverhalten der Komponente KOMP.01 auf Grundlage von in der Vergangenheit dokumentierten Daten untersucht werden. In einer Anzahl von acht baugleichen Stück ist die KOMP.01 im Modelltunnel vorhanden und dauerhaft an die Betriebstechnik angebunden. Bei der Komponente handelt sich um eine Spezialanfertigung, die mit hohen Initialkosten verbunden ist. Der Zeitraum zur Ersatzbeschaffung der KOMP.01 beträgt etwa fünf Wochen. Auf Grundlage der in Tabelle 27 aufgeführten Daten soll das Ausfallverhalten näher untersucht und abschließend interpretiert werden. Fiel in der Vergangenheit die KOMP.01 aus, so wurde durch die Vorhaltung einer neuwertigen Einheit der unmittelbare Austausch möglich. Die in der ersten Tabellenspalte der Bezeichnung KOMP.01 hinzugefügte numerische Kennung gibt Auskunft zum Einbauort im Tunnel.

Komponente [KOMP.Nr-Ort]	Inbetriebnahme [Datum]	Irreparabler Ausfall [Datum]	Resultierende Nutzungsdauer [d]
KOMP.01-01	01.09.1995 09.12.2002	08.12.2002 noch in Betrieb	2656 ---
KOMP.01-02	01.09.1995 06.01.2005 18.08.2011	05.01.2005 17.08.2011 noch in Betrieb	3415 2415 ---
KOMP.01-03	01.09.1995 05.02.2011	04.02.2011 noch in Betrieb	5636 ---
KOMP.01-04	01.09.1995 07.06.2003 18.11.2008	06.06.2003 17.11.2008 noch in Betrieb	2836 1991 ---
KOMP.01-05	01.09.1995 06.08.2003	05.08.2003 noch in Betrieb	2896 ---
KOMP.01-06	01.09.1995 29.05.1999 16.06.2009	28.05.1999 15.06.2009 noch in Betrieb	1366 3671 ---
KOMP.01-07	01.09.1995 18.11.2008	17.11.2008 noch in Betrieb	4827 ---
KOMP.01-08	01.09.1995 21.06.2006 06.02.2012	20.06.2006 05.02.2012 noch in Betrieb	3946 2056 ---

Tabelle 27: Bisherig dokumentiertes Ausfallverhalten der KOMP.01

Der Betreiber beabsichtigt, das Ausfallverhalten der KOMP.01 durch die Weibullverteilung abzubilden und im Anschluss daran die theoretische Nutzungsdauer für Ausfallwahrscheinlichkeiten von 5, 15, 50 sowie 75 % zu bestimmen. Die theoretischen Grundlagen zur statistischen Ermittlung von Komponentennutzungsdauern sind in Abschnitt 4.4.5.2 enthalten.

Zielstellungen der Untersuchung zum statistischen Ausfallverhalten der KOMP.01 können sein:

- Bestimmung der optimalen Variante zum Umgang mit der KOMP.01 unter Zuhilfenahme von Tabelle 22,
- Planung von Instandhaltungsmaßnahmen,
- Grundlage zum Abschluss eines Rahmenvertrages zur Lieferung von Ersatzkomponenten,
- Nutzung der Daten für die Lebenszykluskostenanalyse vergleichbarer Tunnelprojekte.

Für die Weibullanalyse der in Tabelle 27 aufgeführten Ausfallzeitpunkte steht ein EXCEL-gestütztes Berechnungstool zur Verfügung. Die Datei *Weibullanalyse.xlsx* besteht aus einem Tabellenblatt mit dem Titel *KOMP.01*, welches sowohl die Eingabe von Daten beinhaltet, als auch die Berechnungsergebnisse und Diagrammverläufe ausgibt. Durch Duplikation des Tabellenblatts werden Weibullanalysen für weitere Komponenten ermöglicht. Für eine baugleiche Komponente sind bis zu 30 dokumentierte Ausfallzeitpunkte t_i [d] in die farblich hinterlegte Spalte einzugeben. Die Daten in aufsteigender Reihenfolge einzutragen. Die weitere Berechnung und Visualisierung erfolgt automatisch durch Zellenverknüpfungen und der Ausführung von Berechnungsvorschriften. Mit einem Änderungsschutz sind sämtliche Zellen ausgestattet, die nicht farblich hinterlegt sind und keine Dateneingabe erfordern. In der Anlage 1 sind die Eingabemaske sowie einzelne Berechnungszellen, die für die Weibullanalyse der KOMP.01 benötigt werden, gezeigt.

Desweiteren besteht im unteren Teil des Tabellenblattes KOMP.01 die Möglichkeit, in die ebenfalls farblich hinterlegten Zellen Ausfallzeitpunkte für bestimmte Wahrscheinlichkeiten einzugeben. Die mit den Wahrscheinlichkeiten assoziierenden Ausfallzeitpunkte sind nach der in Tabelle 22 dargestellten Systematik zu interpretieren und für die Lebenszykluskostenanalyse weiter zu verwenden.

Das Ergebnis der statistischen Analyse für die Komponente KOMP.01 ist in Abbildung 55 dargestellt. In den Diagrammen (a) bis (d) sind die nach der Weibullfunktion errechneten Kurvenverläufe einzelnen Messwerten gegenübergestellt.

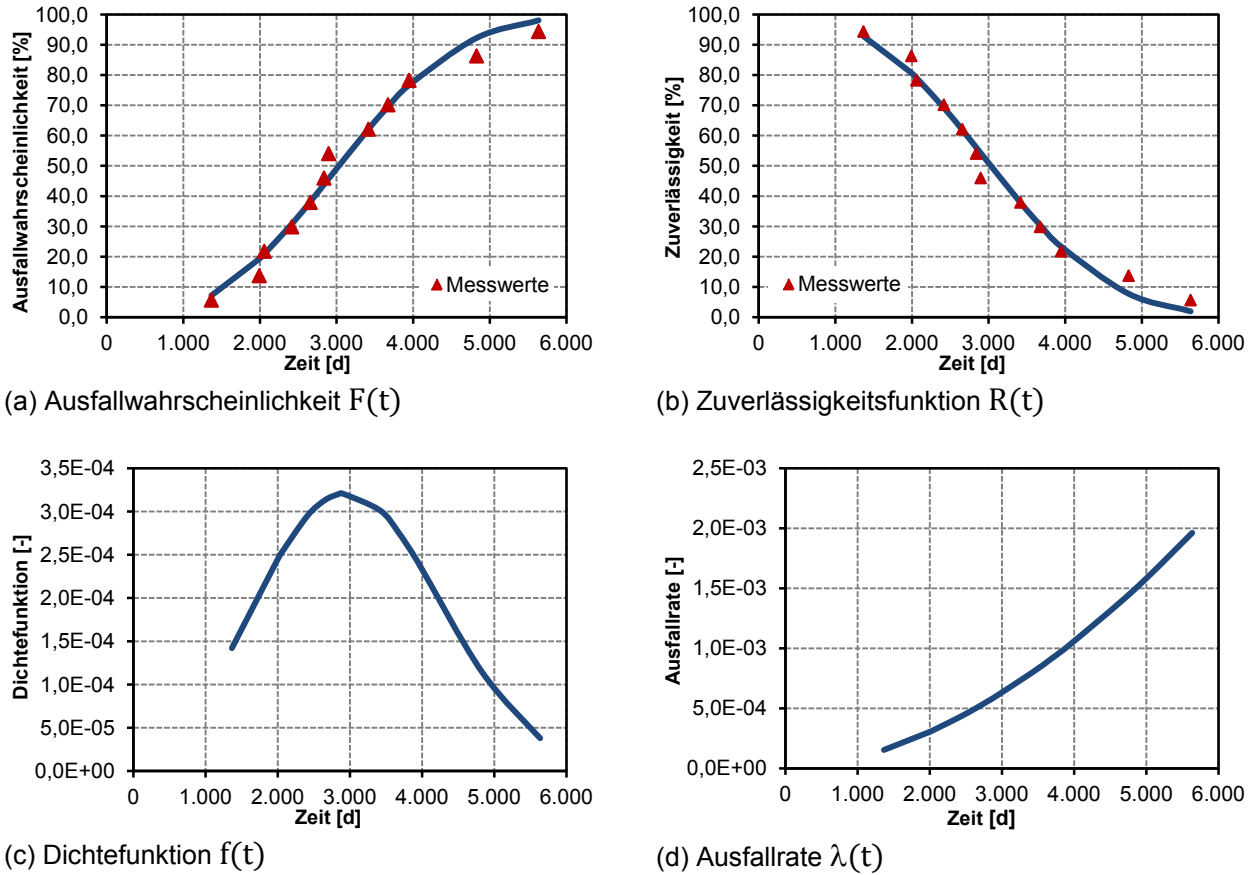


Abbildung 55: Abbildung des Ausfallverhaltens der KOMP.01 durch die Weibullverteilung

Neben der grafischen Visualisierung der Berechnungsergebnisse können auch für gezielt vorgegebene Ausfallwahrscheinlichkeiten die zugehörigen Nutzungsdauern ermittelt werden. Für die Ausfallwahrscheinlichkeiten von 5, 15, 50 und 75 % sind in Tabelle 28 die errechneten Nutzungsdauern nach der Weibullapproximation dargestellt. Weitere Berechnungsergebnisse sowie die Berechnungsvorschrift gehen aus der Anlage 1 hervor.

Ausfallwahrscheinlichkeit $F(t)$	Resultierende Nutzungsdauer nach Weibull [d]
0,05	1.195
0,15	1.804
0,50	3.028
0,75	3.878

Tabelle 28: Ausfallwahrscheinlichkeiten und zugehörige Nutzungsdauern

Die Betrachtungsebene einer einzelnen Komponente soll nun verlassen und der Modelltunnel hinsichtlich der vor und nach der Nachrüstungsmaßnahme vorhandenen Bauteile und Komponenten vollumfänglich beschrieben werden. Die Rohbaukomponenten sind dazu in Tabelle 29, die Ausstattungskomponenten in Tabelle 30 zusammengefasst. Darin ist jeder Komponente eine Positionsnummer, eine verbale Kurzidentifikation (ID), die im Tunnel verbaute Anzahl sowie die für die Lebenszykluskostenanalyse gewählte Nutzungsdauer erfasst. Für alle in den Tabellen aufgeführten theoretischen Nutzungsdauern ist davon auszugehen, dass die Werte entweder wie zuvor gezeigt auf statistischen Auswertungen beruhen oder diese aus Betriebserfahrungen oder Experteneinschätzungen hervorgegangen sind.

Pos.	Bauteil/Komponente	ID	Anzahl	Nutzungsdauer [a]
1.1	Portalbauwerk mit Böschung und Absturzsicherung	Portal	2	90
1.2	Tunnelquerschnitt mit Regenschirmabdichtung <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+010 m bis 0+670 m • Stat. 0+800 m bis 1+460 m 	Tu-Quer1	1	130
1.3	Tunnelquerschnitt mit Rundumabdichtung <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+670 m bis 0+800 	Tu-Quer2	1	130
1.4	Zwischendecke aus Betonfertigteilen <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+010 m bis 1+460 m 	Decke	1	90
1.5	Notausgangsstollen mit 2 Schleusenverbindungen an den Haupttunnel	Stollen	2	130
1.6	Notausgangsschacht mit Treppen- und Aufzugsanlage	Schacht	2	130
1.7	Notausgangsgebäude (Kopfbauwerk) West	BW-West	1	75
1.8	Notausgangsgebäude (Kopfbauwerk) Ost mit Leitzentrale und Technikräumen	BW-Ost	1	75
1.9	Bauwerk zum Ansaugen von Frischluft bzw. zur Abgabe von Abluft (Westportal)	BW-Luft	1	90
1.10	Löschwasserspeicherbecken mit Pumpenbehausung	LöWa	2	90
1.11	Abwassersammelbecken (50 m³) Ostportal	AbWa	1	90
1.12	Schlitzzrinne, einseitig neben der Fahrbahn <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+000 m bis 1+470 m 	Rinne	1	20
1.13	Asphaltfahrbahn <ul style="list-style-type: none"> • Deckschicht mit Markierung • Binderschicht • Tragschicht 	Asphalt	1	20 40 40

Tabelle 29: Rohbauelemente des Modelltunnels mit Nutzungsdauern

Pos.	Bauteil/Komponente	ID	Anzahl	Nutzungsdauer [a]
2.1	Lüftungsklappe in der Zwischendecke mit elektrisch angetriebenen Lamellen	Klappe	22	35
2.2	Strahlventilator	Ventilator	8	35
2.3	Pumpe zur Löschwasserversorgung	Pumpe	3	20
2.4	Hydrant zur Löschwasserentnahme	Hydrant	13	50
2.5	Notrufrkabine mit Ausstattung	Notruf	15	20
2.6	Streckenbeleuchtung <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+000 m bis 1+470 m 	Licht1	1	20
2.7	Sonstige Beleuchtung <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+000 m bis 1+470 m • für beide Notausgänge/Betriebsgebäude 	Licht2	1	20
2.8	Fluchtwegkennzeichnung mit integrierter Orientierungsbeleuchtung	Flucht	62	20
2.9	Leuchtende Markierungsknöpfe auf dem Randweg	Knopf	122	15
2.10	Messgeräte <ul style="list-style-type: none"> • Windgeschwindigkeit • Temperatur • Sichttrübe, CO • Leuchtdichte 	Messung	22	12
2.11	Kameraüberwachung	Kamera	28	15
2.12	Funknetze für Behörden und Tunnelnutzer <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+000 m bis 1+470 m 	Funk	1	20
2.13	Brandmeldekabel <ul style="list-style-type: none"> • Stat. 0+000 m bis 1+470 m 	B-kabel	1	15
2.14	Manueller Brandmelder	B-melder	15	15
2.15	Leitrechner	Rechner	1	8
2.16	Stromversorgung inkl. unabhängige Stromversorgung (USV)	Strom	1	20
2.17	Lautsprecher	L-sprecher	72	15
2.18	Verkehrsbeschilderung	Schilder	26	20
2.19	Schrankenanlage	Schranke	2	20
2.20	Notausgangstür in der Schleuse	NA-Tür	4	30

Tabelle 30: Ausstattungskomponenten des Modelltunnels mit Nutzungsdauern

Zu den in Tabelle 29 für den Modelltunnel aufgeführten Bauteilen und Komponenten ist anzumerken, dass die Positionen 1.2, 1.3, 1.5 und 1.6 den Ausbruch, den Einbau der Außen- und Innenschale, die ggf. erforderliche Auffüllung der Sohle im Bereich mit tiefliegender Sohle bis zur Unterkante Asphaltaufbau, den Randwegbeton mit innenliegenden Leerrohren und Schächten, sämtliche Dränagen mit Schächten sowie die Löschwasserleitung beinhalten. Für die in Tabelle 30 enthaltenen Ausstattungskomponenten, die einen elektrischen Anschluss benötigen oder die Anbindung an den Leitreechner erfordern, wird angenommen, dass sämtliche Nebenleistungen zur Herstellung der Funktionstüchtigkeit in der Hauptposition inkludiert sind.

6.3.2 Monetäre Parameter – Kostenhistorie und Fortschreibung

Da es sich bei dem Modelltunnel um ein Bestandsbauwerk handelt, liegt zunächst, wie in Abschnitt 5.6.2 beschrieben, der Hauptfokus auf der Aufarbeitung der Kostenhistorie zwischen dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme und dem Jahresende 2011. Für den Preisstand des Jahres 1995 sind in den Tabellen 31 und 32 die Initialkosten aufgeführt, die die Investition in die betriebsbereite Herstellung des Bauwerks wiedergeben. Darüber hinaus geht aus zusätzlichen Tabellenspalten hervor, welcher Folgekostenanteil durchschnittlich pro Kalenderjahr im Verhältnis zu den Initialkosten aufgewendet und durch welche Tätigkeiten diese Folgekosten verursacht wurden. Die Ermittlung dieses Verhältniswertes macht es erforderlich, die für die Instandhaltung einer Komponente in der Vergangenheit erfassten Kosten zunächst auf das Preisniveau im Jahr 1995 umzurechnen und in einem Folgeschritt mit den Initialkosten ins Verhältnis zu setzen. An einem Beispiel soll dieses Vorgehen verdeutlicht werden: Hat der Instandhaltungsaufwand für das Bauteil Asphalt (vgl. Pos. 1.13 in Tabelle 31) im Jahr 2002 insgesamt 45.000 € betragen, so muss dieser Wert auf das Preisniveau im Jahr 1995 umgerechnet werden. Dazu wird die Annahme getroffen, dass sich die Preise für die Instandhaltungsarbeiten nach dem Verbraucherpreisindex entwickelt haben. Wie aus Abbildung 45 (c) hervorgeht, beträgt die mittlere Preisveränderungsrate $pf_a = 2,75\%$. Über einen Zeitraum von sieben Jahren errechnet sich der Preissteigerungsfaktor $PF(t)$ in Einklang mit den Erläuterungen in Abschnitt 5.3.4 zu $PF_{x,a}(t=7) = (1+0,0275)^7 = 1,21$. Die im Jahr 2002 entstandenen Kosten in Höhe von 45.000 € korrespondieren demnach mit einem Wert von 37.190 € (= 45.000 / 1,21) im Jahr 1995. Werden nach diesem Prinzip alle Instandhaltungsaufwendungen der Jahre 1996 bis 2011 umgerechnet und ein mittlerer Wert bestimmt, so ergibt sich aus der Division des Mittelwertes durch die Initialkosten der jährliche Instandhaltungsanteil bezüglich der Initialkosten. Für den Asphalt wurde dieser Wert, wie in Tabelle 31 aufgeführt, zu 3,84 % bestimmt.

Diese Vorarbeit verschafft dem Tunnelbetreiber ein detailliertes Bild der zurückliegenden Kostenentwicklung und weist somit einen geringen Unsicherheitsgrad auf. Diese Eigenschaft macht es möglich, eine hohe Prognosegenauigkeit zur Fortschreibung der Folgekosten über den Zeithorizont des Jahres 2012 hinaus zu erzielen.

Der Instandhaltungsaufwand wird zum überwiegenden Teil durch Lohnleistungen geprägt, der übrige Teil entfällt auf den Verbrauch von Stoffen und die Anmietung von Spezialgeräten. Die den Komponenten zugeordneten Folgekosten enthalten jedoch keine Anteile für Überwachungspersonal oder für sonstiges, nicht operativ tätiges Personal.

Pos.	ID	Initialkosten Preisbasis 1995 [€]	Instandhaltungsaufwand	
			Jährl. Anteil bzgl. Initialkosten [%]	Tätigkeiten
1.1	Portal	165.000	11,5	Grünpflege Portalböschung, Monitoring Grundwasserpegel, Winterdienst
1.2	Tu-Quer1	19.800.000	0,95	Überwachung von Betonoberflächen und Bauteilverankerungen, Überprüfung Brandschutz, Inspektion und Hochdruckspülung Bergwasserdränage
1.3	Tu-Quer2	2.145.000	0,95	
1.4	Decke	1.399.250	0,68	Überwachung von Betonoberflächen und Bauteilverankerungen, Überprüfung Brandschutz
1.5	Stollen	1.457.000	1,25	
1.6	Schacht	1.163.750	1,25	Überwachung von Betonoberflächen und Bauteilverankerungen, Überprüfung Brandschutz, Wartung Aufzugsanlage
1.7	BW-West	825.000	7,50	Bauwerksinstandhaltung und Pflege des umliegenden Grundbesitzes, Winterdienst
1.8	BW-Ost	1.365.000	6,20	
1.9	BW-Luft	562.300	0,36	Überwachung Betonoberflächen, Verankerungen, Brandschutz
1.10	LöWa	92.000	0,65	Überwachung Betonoberflächen, Füllstandskontrolle, Funktionstest
1.11	AbWa	53.000	0,92	
1.12	Rinne	132.300	9,60	Reinigung
1.13	Asphalt	1.249.500	3,84	Reinigung, Vermessung, Ausbesserung

Tabelle 31: Initial- und Instandhaltungskosten für die Rohbaukomponenten auf der Preisbasis 1995

Im Gegensatz zur Darstellung in der Tabelle 30 sind die Positionen 2.8, 2.9 und 2.19 nicht in der Tabelle 32 enthalten, da diese nicht zur Erstausrüstung des Tunnels im Jahr 1995 gehören. Die genannten Positionen sind Umfang der Nachrüstungskampagne und verursachen erstmals im Jahr 2012 Initialkosten; ihre Betrachtung erfolgt erst in einem späteren Schritt.

Der überwiegende Teil der Ausstattungskomponenten eines Tunnels zeichnet sich dadurch aus, dass die Folgekosten neben den Instandhaltungskosten auch Kosten für Energie beinhalten. Insbesondere bei Komponenten, die eine hohe Leistungsaufnahme besitzen, können die jährlichen Energiekosten die Instandhaltungskosten übersteigen. Beispielsweise für die Tunnelbeleuchtung oder für die Lüftung kann diese Konstellation eintreten. Komponenten, die eine hohe elektrische Leistungsaufnahme aufweisen, bieten Ansatzpunkte für Einsparungen. Es ist davon auszugehen, dass Forschungsbemühungen zur Erhöhung der Energieeffizienz in den nächsten Jahrzehnten nachhaltige und innovative Lösungsansätze hervorbringen.

Pos.	ID	Initialkosten Preisbasis 1995 [€]	Jährl. Energiekostenanteil bzgl. Initialkosten [%]	Instandhaltungsaufwand	
				Jährl. Anteil bzgl. Initialkosten [%]	Tätigkeiten
2.1	Klappe	18.500	0,64	1,02	Reinigung, Funktionsprüfung (Entrauchungsversuche)
2.2	Ventilator	250.000	5,20	2,25	
2.3	Pumpe	18.000	1,74	1,35	Reinigung, Funktionsprüfung
2.4	Hydrant	5.000	0,00	0,50	
2.5	Notruf	19.500	1,30	2,50	
2.6	Licht1	1.176.000	7,15	7,10	Reinigung, Austausch sämtlicher Leuchtmittel im 3-Jahresrhythmus
2.7	Licht2	380.000	6,93	6,45	
2.10	Messung	8.000	2,03	1,20	Reinigung, Funktionsprüfung
2.11	Kamera	7.500	2,20	1,50	
2.12	Funk	38.500	1,95	0,95	Funktionsprüfung
2.13	B-kabel	110.000	1,20	0,25	
2.14	B-melder	850	0,55	1,00	
2.15	Rechner	85.000	15,30	6,00	Durchführung regelmäßiger Updates
2.16	Strom	125.000	3,00	5,25	Prüfung der USV sowie Austausch der Akkus im 8-Jahresrhythmus
2.17	L-sprecher	1.300	1,20	6,15	Reinigung, Funktionsprüfung
2.18	Schilder	1.000	3,25	3,00	
2.20	NA-Tür	18.000	0,05	5,36	

Tabelle 32: Initial- und Instandhaltungskosten für die Ausstattungskomponenten auf der Preisbasis 1995

Wie zu Beginn dieses Kapitels ausgeführt, sind erhöhte Anforderungen an die Sicherheit in Straßentunneln der primäre Auslöser für die Durchführung der Nachrüstungskampagne im Modelltunnel. Um die erforderlichen Nachrüstungsmaßnahmen sinnvoll mit den abnutzungsbedingten Instandhaltungsleistungen zu kombinieren, erfolgt mit Planungsbeginn die Entwicklung eines Lebenszykluskostenmodells. Einerseits wird dazu auf die technischen Erfahrungen des bisherigen Tunnelbetriebs zurückgegriffen, andererseits muss der Umfang der anstehenden Arbeiten monetär bewertet werden. Aus diesen Rahmenbedingungen erwächst die Forderung, dass der Referenzzeitpunkt der Lebenszykluskostenanalyse auf das Jahr 2012 zu terminieren ist und historische Initialkosten – beispielsweise für die Erstellung des Tunnelquerschnitts – nicht mit in die Analyse einfließen. Für alle bereits vorhandenen sowie für die nachzurüstenden Komponenten müssen daher im nächsten Schritt die Initial- und Folgekosten zum Preisstand im Jahr 2012 ermittelt werden. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die Initialkosten für bereits bestehende und nicht im Jahr 2012 auszutauschende Komponenten keine Initialkosten im Sinne der bisherigen Definition darstellen. Vielmehr handelt es sich dabei um Folgekosten, die einmalig zum Referenzzeitpunkt der Lebenszykluskostenbetrachtung entstehen und die Wiederinbetriebnahme des Modelltunnels kennzeichnen. Um eine eindeutige Abgrenzung zu schaffen, werden diese Initialkosten im Folgenden als sekundäre Initialkosten bezeichnet. Analog zur bisher verwandten Systematik nehmen die Folgekosten Bezug auf die sekundären Initialkosten.

Der Ermittlung der sekundären Folgekosten für den Modelltunnel liegt die folgende Vorgehensweise zugrunde: Zunächst ist für jede Komponente der bisherige Abbau des Abnutzungsvorrates der zu erwartenden Nutzungsdauer gegenüberzustellen. Vom Betreiber ist dann festzulegen in welchem Umfang Instandhaltungsmaßnahmen prognostiziert werden oder ob ggf. der Komplett- oder Teilaustausch einer Komponente durchzuführen ist. Die entsprechenden Kosten sind für das Preisniveau im Jahr 2012 zu ermitteln. Da davon auszugehen ist, dass der Modelltunnel nach Durchführung der Nachrüstungs- und Instandhaltungsmaßnahmen ab Anfang September 2012 wieder seinen regulären Betrieb aufnehmen wird, müssen die entsprechenden Energie- und Instandhaltungskosten für die vier im Jahr 2012 verbleibenden Monate in die sekundären Initialkosten aufgenommen werden. Dass dieser Teil der Folgekosten mit in die sekundären Initialkosten inkludiert wird, ist dadurch begründet, dass Initialkosten wie in Abschnitt 5.3.3 definiert immer zum Ende des Referenzjahres kalkulatorisch erfasst werden.

Die sekundären Initialkosten sowie die Anteile der Folgekosten des Modelltunnels sind in der Tabelle 33 für die Rohbauelemente bzw. in der Tabelle 34 für die Ausstattungskomponenten aufgeführt.

Pos.	ID	Sekundäre Initialkosten auf Preisbasis 2012 [€]	Folgekostenanteil bzgl. der sekundären Initialkosten	
			Jährl. Instandhaltung [%]	Komponentenaustausch ¹⁾ [%]
1.1	Portal	33.480	86,30	Angabe nicht erforderlich, da die Nutzungsdauer der Komponente nicht vor Ablauf der Betrachtungsperiode erreicht wird
1.2	Tu-Quer1	848.610	33,70	
1.3	Tu-Quer2	91.940	33,70	
1.4	Decke	79.350	18,20	
1.5	Stollen	120.090	23,10	
1.6	Schacht	95.920	23,10	
1.7	BW-West	125.540	75,00	
1.8	BW-Ost	198.710	64,80	
1.9	BW-Luft	43.810	7,00	
1.10	LöWa	3.810	23,90	
1.11	AbWa	2.270	32,80	
1.12	Rinne	207.760	9,30	96,90
1.13	Asphalt	784.850	9,30	242,20 (alle Schichten) 96,90 (nur Deckschicht)

¹⁾ erfolgt mit Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer

Tabelle 33: Sekundäre Initialkosten und Folgekostenanteile für Rohbauelemente, Preisbasis 2012

Ein Anteil für den Austausch in der Größenordnung von 100 % beinhaltet die Zusatzinformation, dass die betreffende Komponente im Jahr 2012 durch eine neuwertige ersetzt wird. Ein wesentlich höherer Wert als 100 % zeigt hingegen an, dass die sekundären Initialkosten für das Jahr 2012 ausschließlich Instandhaltungsmaßnahmen und – wenn erforderlich – Energiekosten beinhalten. Für Komponenten, deren theoretische Nutzungsdauer im Jahr 2012 bzw. im darauf folgenden Jahr erreicht wird oder bereits überschritten wurde, erfolgt rechnerisch der vollumfängliche Austausch. Diese Annahme ist als erste Näherung zu verstehen, für die weitere Variantenstudien durchzuführen sind.

Für die in Tabelle 34 enthaltene Position 2.4 (Hydrant) soll die Ermittlung der sekundären Initialkosten und der einzelnen Folgekostenanteile erläutert werden: Im Jahr 1995 wurden zur betriebsbereiten Installation eines Hydranten 5.000 € aufgewendet. Aufgrund der prognostizierten Nutzungsdauer von 50 Jahren besteht im Jahr 2012 nicht die Notwendigkeit, den Hydranten auszutauschen. Dennoch unternimmt der Tunnelbetreiber eine Preisfrage, um das Preisniveau für Lieferung und Einbau eines Hydranten im Jahr 2012 zu erhalten. Durch den günstigsten Bieter wird ihm die Leistung für eine Summe von netto 7.608 € angeboten. Unter der Annahme, dass 10 % der Wiederbeschaffungskosten im Jahr 2012 für die Instandsetzung des Hydranten (Korrosions- und Signalbeschichtung, Austausch von Ventilen) aufzuwenden sind, müssen zunächst 1.978 € pro Stück kalkuliert werden. Weiter wird davon ausgegangen, dass infolge einer Preissteigerung für die jährliche Instandhaltung des Hydranten 38 € anfallen, auf monatlicher Basis sind dies 3,17 €. Kosten für Energie sind für den Hydranten nicht zu berücksichtigen, so dass sich die gesamten sekundären Initialkosten im Jahr 2012 auf rund 780 € summieren. Bezogen auf die sekundären Initialkosten beträgt die jährliche Instandhaltung somit 4,9 %, der Komponentenaustausch nach Erreichen der Nutzungsdauer nimmt einen Anteil von 984 % an. Die hergeleiteten Werte gehen aus Tabelle 34 hervor. In gleicher Weise sind die Angaben für die übrigen Komponenten hergeleitet worden.

Pos.	ID	Sekundäre Initialkosten auf Preisbasis 2012 [€]	Folgekostenanteil bzgl. der sekundären Initialkosten		
			Jährl. Energieverbrauch [%]	Jährl. Instandhaltung [%]	Komponentenaustausch ¹⁾ [%]
2.1	Klappe	2.980	6,10	9,70	947,60
2.2	Ventilator	47.490	41,70	18,00	801,10
2.3	Pumpe	27.680	1,70	1,30	99,00
2.4	Hydrant	780	0,00	4,90	983,60
2.5	Notruf	30.050	1,30	2,50	98,70
2.6	Licht1	1.874.430	6,80	6,80	95,50
2.7	Licht2	604.010	6,60	6,20	95,70
2.8	Flucht	1.600	9,50	6,20	94,80
2.9	Knopf	780	8,10	4,70	95,70
2.10	Messung	12.310	2,00	1,20	98,90
2.11	Kamera	11.560	2,20	1,50	98,80
2.12	Funk	59.150	1,90	0,90	99,00
2.13	B-kabel	168.190	1,20	0,20	99,50
2.14	B-melder	1.310	0,50	1,00	99,50
2.15	Rechner	138.530	14,30	5,60	93,40
2.16	Strom	195.440	2,90	5,10	97,30
2.17	L-sprecher	2.030	1,20	6,00	97,60
2.18	Schilder	1.560	3,20	2,90	98,00
2.19	Schranke	25.660	3,50	2,90	97,90
2.20	NA-Tür	5.980	0,20	24,60	458,60

¹⁾ erfolgt mit Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer

Tabelle 34: Sekundäre Initialkosten und Folgekostenanteile für Ausstattungskomponenten, Preisbasis 2012

Neben den tabellarisch erfassten 13 Rohbauelementen sowie den 20 Ausstattungskomponenten des Modelltunnels wird aufgrund der Erfahrungen mit dem Betrieb des Modelltunnels eine weitere Modultabelle

angelegt. Diese ist mit dem Titel „Nachrüstung“ überschrieben und trägt dem Umstand Rechnung, dass in größeren zeitlichen Abständen weiterer Nachrüstungsbedarf für den Modelltunnel angezeigt ist. Dieser lässt sich mit der Weiterentwicklung von Regelwerken und einem mutmaßlich weiteren Anstieg der sicherheitstechnischen Anforderungen an die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln begründen. Hierfür werden beginnend im Jahr 2012 im 20-Jahresrhythmus 50.000 € auf dem Preisniveau im Jahr 2012 als unspezifische Reserve eingeplant.

6.4 Eingabe in das OTLCC-Analysemodell und Berechnung

Für den Modelltunnel soll die Arbeitsweise der OTLCC-Analyse anhand von zwei unabhängigen Berechnungsfällen aufgezeigt werden: Im ersten Fall wird der Tunnel mit dem Preisstand im Jahr 1995 abgebildet. Dabei werden die Komponenten, die den Umfang der Inbetriebnahme im Jahr 1995 darstellen, unter Berücksichtigung der bisher gesammelten Betriebsdaten implementiert. Im zweiten Fall wird der Modelltunnel für den Preisstand im Jahr 2012 analysiert. Dabei werden für die vorhandenen Komponenten sekundäre Initialkosten in genau der Höhe angesetzt, wie sie für die Ertüchtigung bzw. Erweiterung des Bestandsbauwerks benötigt werden. In beiden Fällen werden die Folgekosten auf Grundlage der Kostenhistorie auf die Initialkosten (Jahr 1995) bzw. auf die sekundären Initialkosten (Jahr 2012) bezogen. Der Betrachtungshorizont endet für beide Fälle zum Ende des Jahre 2065.

Während der erste Fall in der Grundvariante den Status quo des Tunnels abbildet, versteht sich das Berechnungsmodell zum Referenzzeitpunkt 2012 als Ausgangsbasis für darauf aufbauende Variantenstudien. Der erste Fall umfasst eine Gesamtkostenrechnung auf dem Preisniveau im Jahr 1995, der zweite Fall inkludiert lediglich die Kosten, die ab dem Beginn der Nachrüstungs- und Instandhaltungsphase aufgewendet werden. Je nach Zielstellung ist davon auszugehen, dass einem der beiden Fälle der Vorzug gegeben wird, es können aber auch beide Fallstudien parallel vorangetrieben werden. Das Variantenstudium schließt damit ab, dass sich die Vorteilhaftigkeit genau einer Variante gegenüber den anderen Alternativen durchsetzt und eine eindeutige Empfehlung zur Umsetzung von Maßnahmen getroffen wird.

Für die Aufstellung der Lebenszykluskostenanalyse zum Preisstand 1995 werden die Daten der Tabellen 29 bis 32 in die Datei *Basis_LZK_Analyse.xlsx* eingetragen. Darüber hinaus werden weitere Angaben in die Modultabellen eingegeben und durch Ja/Nein-Kennzeichnungen aktiviert oder deaktiviert:

- bei den Initial- und Folgekosten für den Zeitraum zwischen 1995 und 2012 handelt es sich um gesicherte Ist-Kosten, so dass die komponentenspezifische Schwankungsbreite w_j für alle Bauteile auf 0,0 % gesetzt wird,
- da sämtliche Initialkosten im Jahr 1995 in Rechnung gestellt werden, ist die Angabe einer Preissteigerungsrate für die Initialkosten ohne Auswirkung auf die Berechnung,
- für sämtliche Rohbaukomponenten der Positionen 1.1 bis 1.13 erfolgt in Übereinstimmung mit Tabelle 31 keine Differenzierung hinsichtlich der Energie- und Instandhaltungskosten,
- da die Instandhaltungskosten im Wesentlichen Lohnleistungen enthalten, wird die Preisentwicklung an den Verbraucherpreisindex (pf_a) geknüpft,
- der Instandhaltungsanteil für Rohbau- und Ausstattungskomponenten wird nicht mit einer linearen Steigerung beaufschlagt, da angenommen wird, dass dieser Anteil bereits durch die langjährige Kostenhistorie im jährlichen Mittelwert inkludiert ist,
- der Zeithorizont der Lebenszykluskostenanalyse beträgt 70 Jahre, so dass lediglich die Rohbaupositionen 1.12 (Schlitzrinne) und 1.13 (Asphalt) einem Austausch unterliegen. Die Ausstattungskomponenten mit den Positionsnummern 2.1 bis 2.7, 2.10 bis 2.18 und 2.20 werden hingegen in den überwiegenden Fällen mehrfach ausgetauscht,

- wird eine Komponente nach Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer ausgetauscht, so wird nach Bedarf eine Detailplanung für den Austauschgrad vorgenommen,
- der Modelltunnel ist Teil des öffentlichen Streckennetzes, so dass keine Erlöse erzielt werden,
- die Höhe der Preissteigerungsfaktoren bzw. der Kapitalzinssätze orientiert sich an den in den Abschnitten 4.4.5.3 und 4.4.5.4 erörterten Bandbreiten.

Die vervollständigten Modultabellen gehen aus der Datei mit dem Namen *LZK_Analyse_M-tunnel_1995.xlsx* hervor. Die Anlagen 2.1 bis 2.3 zeigen die Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ sowie die Eingabemasken der Modultabellen „Asphalt“ und „Kamera“.

Das zweite Berechnungsmodell bildet den Status des Modelltunnels unmittelbar vor der Ausführung der Nachrüstungs- und Instandhaltungskampagne im Jahr 2012 ab. Der Horizont der Berechnung reicht bis zum Jahresende 2065 und umfasst 53 Betriebsjahre. Für den Aufbau des Modells zum Preisniveau im Jahr 2012 werden die auf praktischen Erfahrungen basierenden theoretischen Nutzungsdauern aus den Tabellen 29 und 30 verwendet, die monetären Parameter zur Eingabe in die einzelnen Modultabellen sind den Tabellen 33 und 34 entnommen worden.

Die Basis für den zweiten Fall der Lebenszykluskostenanalyse bildet wiederum die Datei *Basis_LZK_Analyse.xlsx*. Ergänzend zu den in den Tabellen 29, 30, 33 und 34 aufgeführten Angaben mussten weitere Annahmen getroffen werden. Teilweise sind diese Annahmen identisch mit jenen, die für das erste Rechenmodell getroffen wurden. Insgesamt wurden die folgenden Annahmen getroffen:

- die Schwankungsbreite w_j beträgt für Rohbauelemente 2 %, für Ausstattungskomponenten 1 %. Für die Komponente „Nachrüstung“ wird auf die Vorgabe einer Schwankungsbreite verzichtet,
- für sämtliche Rohbaukomponenten der Positionen 1.1 bis 1.13 erfolgt in Übereinstimmung mit Tabelle 33 keine Aufteilung nach Energie- und Instandhaltungskosten,
- da die Instandhaltungskosten im Wesentlichen Lohnleistungen enthalten, wird die Preisentwicklung durch den Verbraucherpreisindex (pf_a) abgebildet,
- der Instandhaltungsanteil für alle Rohbauelemente wird mit einer moderaten linearen Steigerung beaufschlagt; bei den Ausstattungskomponenten wird hingegen nur für die Elemente „Messgeräte“ und „NATür“ dieser Ansatz verfolgt,
- über den Zeithorizont der Lebenszykluskostenanalyse unterliegen lediglich die Rohbaupositionen 1.12 (Schlitzrinne) und 1.13 (Asphalt) einem Komplettaustausch. Die Ausstattungskomponenten mit den Positionsnummern 2.1 bis 2.20 werden hingegen teilweise mehrfach ausgetauscht,
- wird eine Komponente nach Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer ausgetauscht, so wird nach Bedarf eine Detailplanung für den Austauschgrad vorgenommen,
- der Modelltunnel ist Teil des öffentlichen Streckennetzes, so dass keine Erlöse erzielt werden,
- die Höhe der Preissteigerungsfaktoren bzw. der Kapitalzinssätze orientiert sich an den in den Abschnitten 4.4.5.3 und 4.4.5.4 erörterten Bandbreiten.

Das gesamte Modell ist in der Datei *LZK_Analyse_M-tunnel_2012.xlsx* sowie in der pdf-Datei mit demselben Namen enthalten. Stellvertretend sind in den Anlagen 3.1 bis 3.3 die Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ sowie die Masken für die Dateneingaben der Komponenten „Rinne“ und „Rechner“ aufgeführt.

Für eine detaillierte Beschreibung der schrittweisen Durchführung der Berechnung wird auf die Beschreibungen im Abschnitt 5.5.2 verwiesen. Es bleibt anzumerken, dass aufgrund der Komplexität der Berechnungsalgorithmen Rechenzeiten von sechs bis acht Stunden erreicht werden können. Durch die Nutzung eines sehr leistungsfähigen Computers lässt sich dieser Wert reduzieren.

6.5 Ausgabe und Ergebnis

Um das Spektrum der ausgeführten Berechnungen aufzuzeigen, sollen die Ergebnisse der Lebenszykluskostenanalyse sowohl für eine separate Komponente als auch für alle Komponenten, die den Modelltunnel als Ganzes abbilden, ausgewertet werden. Dazu ist es erforderlich, die Auswirkungen der unterschiedlichen Referenzzeitpunkte, als auch die Variationen der verschiedenen Eingangsparameter zu diskutieren.

Zunächst wird die Kostenentwicklung für die Komponente mit der Kennung „Tu-Quer1“ betrachtet. Diese spezifiziert einen 1.320 m langen Abschnitt des Haupttunnels, der mit einer Regenschirmabdichtung ausgestattet ist. In Tabelle 35 sind die kumulierten Barwerte für sämtliche Initial- und Folgekosten der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 1995 aufgetragen. Während die Initialkosten die Aufwendungen für die gesamte bauliche Realisierung bis zur Inbetriebnahme ausdrücken, umfassen die Folgekosten sämtliche Betriebs- und Instandhaltungsinvestitionen bis zum Ende des Betrachtungshorizontes im Jahr 2065. Da die Nutzungsdauer einer Rohbaukomponente die Gesamtnutzungsdauer eines Tunnels maßgeblich beeinflusst, ist ein Komplettaustausch der Komponente „Tu-Quer1“ nicht vorgesehen.

In Abschnitt 6.4 wurde darauf hingewiesen, dass die gesammelten Betriebsdaten den Ansatz einer Schwankungsbreite für die Initial- und Folgekosten entbehrlich machen. Somit beinhaltet Tabelle 35 unter der Vorgabe von je drei Werten für den Kapitalzinssatz bzw. für die Preissteigerungsrate eine Anzahl von neun Kapitalwerten. Die Bedeutung des Kapitalwerts lässt sich auch folgendermaßen formulieren: Unter der Voraussetzung, dass die zum Referenzzeitpunkt als Kapitalwert errechnete Summe zur Verfügung steht und der Investor eine Finanzanlage zum gewählten Kapitalzinssatz erzielt, lassen sich unter Annahme der prognostizierten Preissteigerung alle Zahlungsflüsse über die Dauer des Betriebs eines Bauwerks erfüllen.

projektübergreifende Vorgaben		Preissteigerungsrate – PSR [% p.a.]		
		gering (↓): 1,0 bis 1,5	mittel (→): 2,5 bis 2,75	hoch (↑): 4,0
Kapitalzinssatz – KZS [% p.a.]	gering (↓): 2,0	29,3 Mio €	35,5 Mio €	48,1 Mio €
	mittel (→): 3,0	26,9 Mio €	30,9 Mio €	38,7 Mio €
	hoch (↑): 5,0	24,2 Mio €	26,1 Mio €	29,4 Mio €

Tabelle 35: Kapitalwerte der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 1995, über 70 Jahre

Wie erwartet löst eine steigende Preisentwicklung einen Anstieg des Kapitalwerts und ein sukzessiv steigender Kapitalzinssatz eine schrittweise Verringerung des Kapitalwerts aus. Demzufolge resultiert aus einem geringen Kapitalzinssatz in Kombination mit einer hohen Preissteigerungsrate der in Tabelle 35 eingetragene maximale Kapitalwert in Höhe von 48,1 Mio €. Ein hoher Kapitalzinssatz führt indes unter den Voraussetzungen, dass sich die Preise auf einem geringem Niveau entwickeln und Kapital zu einem hohen Zins angelegt werden kann, zu einem Minimum des Kapitalwerts in Höhe von 24,2 Mio €. Die hohe Sensitivität des Berechnungsmodells manifestiert sich besonders dadurch, dass eine annähernde Verdopplung des Kapitalwerts von 24,2 auf 48,1 Mio € durch die Anhebung des Kapitalzinssatzes um 3 Prozentpunkte sowie die Erhöhung der Preissteigerungsrate um 2,5 bzw. 3 Prozentpunkte ausgelöst wird. Grafisch ist das Ergebnis über den Betrachtungszeitraum in Anlage 4.1 dargestellt.

Ausgehend von den sekundären Initialkosten und den darauf bezogenen Folgekosten sind in der Tabelle 36 die Kapitalwerte für die Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 2012 über einen Analysezeitraum von 53 Jahren bis zum Jahresende 2065 erfasst. Neben einem geringen, mittleren und hohen Wert für Kapitalzinssatz und Preissteigerungsrate wurde zudem der Faktor w_j zur Berücksichtigung der Schwankungsbrei-

te der Initial- und Folgekosten vorgegeben. Diese Festlegungen führen dazu, dass für die Entwicklung der Lebenszykluskosten die in Tabelle 36 und Anlage 4.2 gezeigten Verlaufskarakteristiken entstehen.

projektübergreifende Vorgaben		Preissteigerungsrate – PSR [% p.a.]		
		gering (↓): 1,0 bis 1,5	mittel (→) 2,5 bis 2,75	hoch (↑) 4,0
Kapitalzinsatz – KZS [% p.a.]	gering (↓): 2,0	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾
		gering (↓) 12,3 Mio €	gering (↓) 17,8 Mio €	gering (↓) 27,0 Mio €
		mittel (→) 12,6 Mio €	mittel (→) 18,2 Mio €	mittel (→) 27,6 Mio €
		hoch (↑) 12,8 Mio €	hoch (↑) 18,6 Mio €	hoch (↑) 28,1 Mio €
	mittel (→): 3,0	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾
		gering (↓) 10,0 Mio €	gering (↓) 13,9 Mio €	gering (↓) 20,3 Mio €
		mittel (→) 10,2 Mio €	mittel (→) 14,2 Mio €	mittel (→) 20,7 Mio €
		hoch (↑) 10,4 Mio €	hoch (↑) 14,5 Mio €	hoch (↑) 21,2 Mio €
	hoch (↑): 5,0	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾
gering (↓) 7,0 Mio €		gering (↓) 9,1 Mio €	gering (↓) 12,4 Mio €	
mittel (→) 7,1 Mio €		mittel (→) 9,3 Mio €	mittel (→) 12,7 Mio €	
	hoch (↑) 7,3 Mio €	hoch (↑) 9,5 Mio €	hoch (↑) 12,9 Mio €	

¹⁾ IFK = Initial- und Folgekosten (hier: sekundäre Initialkosten)

Tabelle 36: Kapitalwerte der Komponente „Tu-Quer1“ zum Referenzzeitpunkt 2012, über 53 Jahre

Der Anwender hat jederzeit die Möglichkeit, einzelne Annahmen in den komponentenspezifischen Modultabellen zu verändern und die monetären Auswirkungen sofort zu erkennen. Durch dieses Vorgehen kann eine schrittweise Annäherung an die optimale Modellierung einer Komponente erreicht werden. Das beschriebene Vorgehen ist allerdings nur dann geeignet, wenn die Abänderung von Annahmen für eine Komponente isoliert betrachtet werden kann und keine Auswirkungen auf weitere Komponenten zu erwarten sind. Erfordert die Modifizierung von Annahmen für eine einzelne Komponente jedoch die Ergänzung, Eliminierung oder Anpassung weiterer Modultabellen, so ist die Vorteilhaftigkeit nur anhand einer Lebenszykluskostenanalyse für die Gesamtheit aller Komponenten nachzuweisen. Im Weiteren erfolgt der Übergang von einer Komponente auf die Gesamtheit aller Komponenten.

In Tabelle 37 sind die Kapitalwerte für alle im Modelltunnel zum Referenzzeitpunkt 1995 vorhandenen Komponenten aufgeführt. Die zuvor betrachtete Komponente „Tu-Quer1“ (Tabelle 35) ist somit ein Element aus der Gesamtheit aller Komponenten. Für die Ermittlung der Kapitalwerte gelten hingegen dieselben Randbedingungen wie sie zuvor für die Werte in Tabelle 35 angegeben wurden. Die zeitabhängige Entwicklung der Kapitalwerte über den Zeitraum von 1995 bis 2065 ist zudem in der Anlage 4.3 als Diagramm enthalten. Es sei darauf hingewiesen, dass die in Tabelle 37 aufgeführten Preissteigerungsraten gegenüber den Angaben in den Tabellen 35 und 36 veränderte Werte aufweisen. Dieses ist dadurch zu begründen, dass sich die Anzahl der Preisindizes bei der Betrachtung der Gesamtheit der Komponenten gegenüber der Untersuchung einer Komponente erhöht hat. Die geringe, die mittlere und die hohe Preissteigerungsrate weisen aus diesem Grund eine vergrößerte Amplitude auf.

projektübergreifende Vorgaben		Preissteigerungsrate – PSR [% p.a.]		
		gering (↓): 1,0 bis 2,5	mittel (→) 2,5 bis 5,0	hoch (↑) 4,0 bis 7,5
Kapitalzinsatz – KZS [% p.a.]	gering (↓): 2,0	106,3 Mio €	177,4 Mio €	379,2 Mio €
	mittel (→): 3,0	88,0 Mio €	132,6 Mio €	253,1 Mio €
	hoch (↑): 5,0	67,9 Mio €	87,1 Mio €	133,6 Mio €

Tabelle 37: Kapitalwerte für alle Komponenten zum Referenzzeitpunkt 1995, über 70 Jahre

Analog zur Vorgehensweise für die Komponente „Tu-Quer1“ ist in Tabelle 38 bzw. in Anlage 4.4 das Ergebnis der Lebenszykluskostenanalyse für den Modelltunnel ab dem Zeitpunkt zusammengefasst, der mit dem Beginn der Nachrüstungs- und Instandhaltungskampagne im Jahr 2012 zusammenfällt. Da die sekundären Initialkosten zum Referenzzeitpunkt 2012 anfallen, unterliegen sie keiner Diskontierung. Für die in Tabelle 38 aufgeführten Kapitalwerte können die im Folgenden genannten Initialkosten subtrahiert werden um die kapitalisierten Folgekosten zu erhalten: 7,93 Mio € für gering, 8,04 Mio € für mittlere und 8,15 Mio € für hoch angenommene Initial- und Folgekosten (IFK).

projektübergreifende Vorgaben		Preissteigerungsrate – PSR [% p.a.]		
		gering (↓): 1,0 bis 2,5	mittel (→) 2,5 bis 5,0	hoch (↑) 4,0 bis 7,5
Kapitalzinssatz – KZS [% p.a.]	gering (↓): 2,0	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾
		gering (↓) 98,8 Mio €	gering (↓) 155,6 Mio €	gering (↓) 271,5 Mio €
		mittel (→) 100,2 Mio €	mittel (→) 157,7 Mio €	mittel (→) 275,0 Mio €
		hoch (↑) 101,6 Mio €	hoch (↑) 159,8 Mio €	hoch (↑) 278,6 Mio €
	mittel (→): 3,0	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾
		gering (↓) 79,1 Mio €	gering (↓) 119,2 Mio €	gering (↓) 198,7 Mio €
		mittel (→) 80,2 Mio €	mittel (→) 120,9 Mio €	mittel (→) 201,4 Mio €
		hoch (↑) 81,4 Mio €	hoch (↑) 122,5 Mio €	hoch (↑) 204,0 Mio €
	hoch (↑): 5,0	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾	Faktor w_j bzgl. IFK¹⁾
gering (↓) 54,6 Mio €		gering (↓) 75,7 Mio €	gering (↓) 115,1 Mio €	
mittel (→) 55,3 Mio €		mittel (→) 76,8 Mio €	mittel (→) 116,6 Mio €	
	hoch (↑) 56,1 Mio €	hoch (↑) 77,8 Mio €	hoch (↑) 118,2 Mio €	

¹⁾ IFK = Initial- und Folgekosten (hier: sekundäre Initialkosten)

Tabelle 38: Kapitalwerte für alle Komponenten zum Referenzzeitpunkt 2012, über 53 Jahre

Als ein weiteres Ergebnis lässt sich aus der Lebenszykluskostenanalyse der in Abschnitt 5.5.3 eingeführte, zeitabhängige Folgekostenindex ermitteln. Das Verhältnis der fortlaufend aufsummierten Barwerte der Folgekosten zu den Initialkosten drückt für jede Komponente unter Variation der Eingangsparameter aus, welcher prozentuale Anteil zu einem bestimmten Zeitpunkt durch die Nutzung verursacht wird. Durch kurze Nutzungsdauern, einen hohen Energie- oder Instandhaltungsaufwand können die Folgekosten über die Gesamtnutzungsdauer des Tunnelbauwerks ein Vielfaches der Initialkosten annehmen. In Anlage 5 ist der Folgekostenindex für die Komponente „Tu-Quer1“ aufgetragen. Im Einzelnen zeigen die Anlagen 5.1 und 5.2 die Entwicklungen zu den Referenzzeitpunkten 1995 und 2012.

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

Die Planung und der Betrieb von Straßentunneln gehören zu den hoheitlichen Aufgaben, die durch die öffentliche Hand erfüllt und nur in begrenztem Maße in den Verantwortungsbereich Dritter übertragen werden. Von einigen privatfinanzierten Tunnelprojekten abgesehen, besitzen wirtschaftliche Überlegungen bei der Erfüllung dieser Aufgaben bisher nur einen untergeordneten Stellenwert.

Wie in Kapitel 2 der Arbeit ausgeführt, besteht für eine in den nächsten Jahren deutlich zunehmende Anzahl der momentan betriebenen Straßentunnel die Notwendigkeit, größere Instandhaltungsmaßnahmen oder die durch Anpassung von Richtlinien geforderte sicherheitstechnische Nachrüstung auszuführen. Wie ferner aufgezeigt wurde, hat der Modernitätsgrad des gesamten Bundesfernstraßennetzes seit der Wiedervereinigung sukzessive abgenommen, so dass die öffentliche Hand aufgrund der Straffung von Haushaltsmitteln den erforderlichen Bedarf an Instandhaltungsmaßnahmen nicht in vollem Maße abdecken kann. Von dieser Entwicklung sind auch die Ingenieurbauwerke wie Straßenbrücken und -tunnel betroffen.

Neben der Erhaltung von Bestandstunneln wird nach Einschätzung von Experten auch in den nächsten Jahren der Bedarf an neuen Tunneln auf einem hohen Niveau verbleiben. Beengte Platzverhältnisse, die Rückgewinnung von Grün- oder Erholungsflächen sowie der Schutz der Anwohner vor Abgasen und Lärmimmissionen führen dazu, dass insbesondere in dichtbesiedelten Gebieten weitere Tunnelbauwerke errichtet werden. Da Tunnel im Straßennetz die Bauwerke sind, die die höchsten Herstell- und Betriebskosten erfordern, muss eine neue Basis geschaffen werden, nachhaltig über Investitionen zu entscheiden. Auf das Wesentliche reduziert, ist darunter zu verstehen, dass das Kosten/Nutzen-Verhältnis unter Berücksichtigung des Zeiteinflusses optimiert werden muss. Das Lebenszykluskostenkonzept kann der beschriebenen Anforderung gerecht werden. Dazu wurde in Kapitel 4 dieser Arbeit der im Immobiliensektor und teilweise auch im Ingenieurhochbau etablierte Lebenszykluskostengedanke auf die Charakteristiken von Straßentunneln übertragen. Der Kerngedanke besteht darin, die aus den technischen Eigenschaften der in einem Tunnel verbauten Bauteile und Komponenten hervorgehenden ökonomischen Entwicklungen aufzuzeigen. Das in der Betriebswirtschaftslehre entwickelte Lebenszykluskostenkonzept greift dabei auf die Verfahren der Investitionsrechnung zurück.

Den Ausgangspunkt einer Lebenszykluskostenanalyse bildet stets die Identifizierung sämtlicher baulicher und betrieblicher Rahmenbedingungen, denen ein Tunnelbauwerk ausgesetzt ist. Die in Abschnitt 4.3.2 beschriebenen inneren und äußeren Randbedingungen zeigen die Abhängigkeiten auf, die bei der Neuplanung oder in eingeschränktem Umfang im Zuge der Ertüchtigung eines Tunnels zu berücksichtigen sind. Unter Beachtung der technischen Eigenschaften, die aus Nutzungsdauern oder Instandhaltungszyklen für einzelne Bauteile und Komponenten resultieren, müssen anschließend verschiedene Kostenanteile prognostiziert werden. Jedem Bauteil bzw. jeder Komponente werden dabei Initialkosten für die betriebsbereite Errichtung und Folgekosten für Energie und Instandhaltung zugeordnet. Aus der Aufstellung verschiedener Planungsvarianten resultiert unwillkürlich eine leicht veränderte Verteilung der Initial- und Folgekosten. Wird der Prozess zur Untersuchung verschiedener Varianten gezielt gesteuert, so spiegelt sich das Substitutionspotenzial wider, das von den Initial- und Folgekosten ausgeht. Die Substitution beschreibt in diesem Kontext den Vorgang, Kosten von einem frühen auf einen späteren Zeitpunkt oder umgekehrt zu verlagern.

Grundsätzlich unterliegen Kosten zeitlichen Schwankungen, die einerseits aus dem statistisch verteilten Ausfallverhalten der Bauteile und Komponenten resultieren, andererseits aber auch durch zukünftige unterschiedliche Preisentwicklungen und die Wahl von Kapitalzinssätzen für die Investitionsrechnung verursacht werden. Wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, besteht die Möglichkeit, sinnvolle Bandbreiten für einzelne Kostenanteile in die Berechnung einfließen zu lassen. Durch die konsequente Mitführung dieser Bandbreiten weist auch das Ergebnis eine Schwankungsbreite auf, deren Begrenzungen durch Extremwerte gebildet

werden. Es wird ein Vorgehen aufgezeigt, schwankungsbeeinflusste Größen zu identifizieren sowie deren Größenordnung in Abhängigkeit zu den vorherrschenden Rahmenbedingungen zu bestimmen.

Aus der Bearbeitung ist ein softwaregestütztes Tool hervorgegangen, das die Lebenszykluskosten für Straßentunnel über einen vom Anwender zu spezifizierenden Zeitraum berechnet, analysiert und grafisch auswertet. Ein großer Anwenderkreis interessierter Fachplaner und Bauwerksbetreiber soll dadurch erreicht werden, dass das Tool in einer den meisten Computeranwendern vertrauten EXCEL-Umgebung programmiert wurde. Mit der Anwendung des Tools können im Wesentlichen zwei Aufgabenstellungen verfolgt werden. Der erste mit PTLCC (Preliminary Tunnel Life-Cycle Costs) bezeichnet Fall findet bereits ab einer sehr frühen Planungsphase für den Neubau eines Straßentunnels Anwendung. Die zweite, als OTLCC-Anwendung (Operational Tunnel Life-Cycle Costs) bezeichnete Variante, dient der Nachbildung und Fortschreibung der Lebenszykluskosten von Bestandstunneln. Auf Grundlage von in der Vergangenheit dokumentierten Initial- und Folgekosten wird dabei zunächst die Nachbildung des bis zum Betrachtungszeitpunkt erfolgten Tunnelbetriebs vorgenommen. Auf dieses Fundament baut in einem nächsten Schritt die Lebenszykluskostenanalyse für die Dauer des zukünftigen Tunnelbetriebs auf. Gegebenenfalls gehen der Fortsetzung des Tunnelbetriebs Bauwerksmodifizierungen voraus. Anhand eines Beispielprojekts wird die erarbeitete Systematik schrittweise aufgezeigt und ein Ansatz zur Interpretation der Berechnungsergebnisse zur Verfügung gestellt.

Die Berechnungsergebnisse können in zweifacher Hinsicht weitergenutzt werden. Zunächst erhält der Bauherr bzw. der Investor eine Angabe dazu, welche Kapitalhöhe benötigt wird, um sämtliche an das Bauwerk aus heutiger Sicht gestellten Anforderungen im Lauf des Lebenszyklus erfüllen zu können. Ein zweiter Nutzen betrifft die Abgrenzung alternativer Planungen untereinander. Unter der Voraussetzung, dass alternative Entwürfe identische Funktionen erfüllen und die Bandbreite zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in diesem zweiten Fall gezielt vernachlässigt wird, ergibt sich eine Rangfolge der untersuchten Alternativen. In diesem Fall ist also nicht der absolute Kapitalwert das Entscheidungskriterium, sondern das Verhältnis der Kapitalwerte untereinander.

7.2 Ausblick

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Tool zur Berechnung der Lebenszykluskosten von Straßentunneln ist im nächsten Schritt konsequent in die Projektbearbeitung einzubinden. Die beiden Hauptanwendungen, das PTLCC- und das OTLCC-Tool sollten dabei zunächst getrennt einer praktischen Erprobung unterzogen werden. Da gegenwärtig nur ein sehr beschränkter Datenumfang zu Nutzungsdauern von technischen Ausstattungskomponenten eines Straßentunnels vorliegt, sollte die Praxisanwendung auch dazu genutzt werden, mit der Erfassung von entsprechenden Daten zu beginnen. Die Dokumentation von Nutzungsdauern in einer Datenbank trägt einerseits dazu bei, den Genauigkeitsgrad zukünftiger Lebenszykluskostenermittlungen zu verbessern, andererseits können die aus praktischen Anwendungen gewonnenen Daten in Richtlinien und Planungsleitfäden implementiert werden. Wie in Abschnitt 2.5.7 erläutert, stehen dem planenden Ingenieur derzeit nur die in der Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung [32] veröffentlichten und in Tabelle 7 wiedergegebenen theoretischen Nutzungsdauern für Straßentunnel zur Verfügung. Hierbei wird jedoch nur zwischen den Tunnelbauverfahren und der nicht weiter spezifizierten betriebs- und verkehrstechnischen Ausstattung unterschieden. In Abschnitt 4.3.4 wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Angabe nur einer Nutzungsdauer für die Tunnelausstattung von pauschal 20 Jahren eine zu optimistische Schätzung darstellt. In Gesprächen mit Planungsingenieuren und Herstellern von Tunnelausstattungen wurde stets betont, dass EDV-gesteuerte Ausstattungselemente eine Nutzungsdauer von 20 Jahren in der Regel nicht erreichen.

Darüber hinaus sollte die Datenbank um Richtwerte für jährliche Betriebsaufwendungen ergänzt werden. Bei Komponenten, die eine hohe Leistungsaufnahme besitzen, ist nach Energie- und Instandhaltungsbedarf zu

differenzieren. Da davon auszugehen ist, dass sich die Preise für die Ersterstellung einer Komponente gegenüber den Kosten für Energie bzw. Instandhaltung nicht in gleicher Größenordnung weiterentwickeln, ist eine Systematik vorzugeben, die diese Entwicklung widerspiegelt. Die Koppelung an die Entwicklung statistisch erhobener Preisindizes könnte hier einen zielführenden Ansatz darstellen.

Gegenwärtig gehen die Berechnungen der Lebenszykluskosten auf die Ansätze der Kapitalwertmethode zurück. Eine Detaillierung könnte in Einklang mit den Ausführungen in Abschnitt 5.2.2 dadurch erzielt werden, dass die Aufstellung vollständiger Finanzpläne als Zusatzoption in den Berechnungsablauf integriert wird. Für Tunnelprojekte, die neben Aus- auch Einzahlungen aufweisen, würde hierdurch eine Differenzierung der Kapitalzinssätze erreicht und eine Abkehr von den Bedingungen des vollständigen Kapitalmarktes vollzogen. Tunnelprojekte, die auf einer Öffentlich Privaten Partnerschaft basieren und die zwingend Erlöse zur Tilgung von Krediten erwirtschaften müssen, stellen in diesem Kontext den Hauptanwendungsbereich dar.

In Abschnitt 6.4 wird ausgeführt, dass die Dauer zur Berechnung der Lebenszykluskosten in Abhängigkeit von der Anzahl der zu berücksichtigten Komponenten eine Größenordnung mehrerer Stunden erreicht. Mit der potenziellen Weiterentwicklung des PTLCC-/OTLCC-Tools sollte daher eine kritische Prüfung erfolgen, die VBA-Programmierung effizienter zu gestalten oder eine alternative Programmiersprache zu wählen. Mit einer Abkehr von der VBA-Programmierung könnte auch der Gedanke verfolgt werden, die Eingaben in den einzelnen Modultabellen über eine Menüsteuerung zu realisieren. Weiterhin wäre eine Integration des Hilfsmittels zur statistischen Modellierung erfasster Ausfallzeitpunkten von Komponenten (vgl. Abschnitt 6.3) in den Gesamtumfang des Tools denkbar.

Eine weitergehende Interpretation der Berechnungsergebnisse kann durch den Einsatz der Monte Carlo Analyse erreicht werden. Die Monte Carlo Analyse nutzt stochastische Verfahren, um die im vorliegenden Fall errechneten Lebenszykluskosten mit einer zuvor gewählten Verteilungsfunktion zu überlagern. Auf diese Weise erhält der Anwender eine Ergebnisbandbreite, die mit spezifischen Zuverlässigkeitswerten verbunden ist. Der Implementierung der Monte Carlo Analyse muss zwingend eine Untersuchung vorausgehen, aus der geeignete statistische Ansätze für die hier verfolgte Zielstellung hervorgehen. Kommt die Monte Carlo Analyse zum Einsatz, so müssen die momentanen im Tool verfolgten Ansätze im Hinblick auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten modifiziert werden. Des Weiteren ist der Anwender bei der Interpretation der Ergebnisse adäquat zu unterstützen.

Das Tool ist derzeit ausschließlich auf die Charakteristiken von Straßentunneln ausgerichtet. Grundsätzlich kann das Tool auch an andere Tunnel, beispielsweise Bahn-, U-Bahn- oder Versorgungstunnel adaptiert werden. Die konzeptionelle Herangehensweise und der Berechnungsgang stellen sich dabei identisch dar. Jedoch besteht die Herausforderung einer Übertragung zunächst darin, die bauwerksspezifischen Bauteile und Komponenten zu identifizieren und aus technischer Sicht zu beschreiben. Übergeordnet hat auch hier der Leitsatz Gültigkeit, dass nur ein Vergleich von Bauwerken möglich ist, die dieselben Funktionen erfüllen und somit echte Alternativen darstellen.

Ein erweiterter Nutzen kann von der Berechnung der Lebenszykluskosten ausgehen, wenn zusätzliche monetäre Einflüsse in das Tool eingehen. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Berücksichtigung der indirekten Kosten (vgl. Abschnitt 4.2.1) zu nennen. Diese sind mit geeigneten Methoden zu ermitteln, wenn z.B. ein Tunnelbauwerk gegenüber einer alternativen Streckenführung Reisezeitverkürzungen, Einsparungen von CO₂-Emissionen oder die Entstehung neuer Grün- und Parkanlagen auslöst. Diese und ggf. darüber hinaus gehende Überlegungen sollten in eine Argumentationslinie eingebettet werden, wenn eine grundsätzliche Entscheidung über die Realisierung eines Tunnelbauwerks zu erarbeiten ist.

Schließlich kann die Lebenszykluskostenberechnung auch einen Beitrag dazu leisten, die Wirtschaftlichkeit innovativer Entwicklungen, die beim Tunnelbau oder bei der Ausstattung von Tunneln zum Einsatz kommen können, zu bewerten. Diese Untersuchung hat den Charakter einer Fallstudie, setzt jedoch voraus, dass die

generelle technische Machbarkeit gegeben ist und die Initial- und Folgekosten valide abzuschätzen sind. Beispiele für derartige Entwicklungen sind der Einbau von Wassernebel-Brandbekämpfungsanlagen, Geothermieanlagen zur Nutzung der Erdwärme oder die Installation von Beleuchtungen mit LED-Technologie. Weitergehende Erläuterungen zu den exemplarisch herausgegriffenen Innovationen sind in Ausführungen von Leucker und Kratzmeir [120] (Wassernebel-Brandbekämpfung), Mayer und Franzius [124] (Geothermie) sowie von Ireland und Bigger [102] (LED-Leuchten) zu finden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Agethen, U.; Frahm, K.-J.; Renz, K.; Thees, E.P.: *Lebensdauer von Bauteilen, Zeitwerte*. Essen: Bund Technischer Experten e.V., 2008
 - [2] Arlt, J.; Pfeiffer, M.: *Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau*. Institut für Bauforschung e.V. Hannover im Auftrag des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2004
 - [3] ASTM International: *ASTM E 917-05 – Standard Practice for Measuring Life-Cycle Costs of Buildings and Building Systems*. West Conshohocken, 2009
 - [4] Australian/New Zealand Standard: *AS/NZS 4536:1999 – Life cycle costing - An application guide*. Homebush and Wellington: SAI Global, 1999
 - [5] Badmann, M; Gerlach, A.: *Lebenszyklusbetrachtung am Beispiel der technischen Gebäudeausrüstung*. In: MAPmagazin 01/2004, S. 24-26
 - [6] Bahr, C; Lennerts, K.: *Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen (Endbericht)*. Forschungsbericht im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) sowie des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung, 2010
 - [7] Baltzer, W.: *Entwicklung der RABT – Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln*. In: Tunnel – Sonderausgabe zur Verabschiedung von Dr. F. Blennemann, 2005, S. 15-20
 - [8] Bertsche, B.; Lechner, G.: *Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau*. Heidelberg: Springer, 2004
 - [9] Blohm, H.; Lüder, K.: *Investition – Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. München: Verlag Franz Vahlen, 1995
 - [10] Boussabaine, H.A.; Kirkham, R.J.: *Whole Life-Cycle Costing – Risk and Risk Responses*. Oxford: Blackwell Publishing, 2004
 - [11] Bouvier, D.: *Construction et rénovation du tunnel Maurice Lemaire*. Pays et Ville D’Art et D’Histoire, 2008
 - [12] Braschel, R.; Hetzer, B.: *Facility Management in der Praxis – Effizienteres und wirtschaftlicheres Betreiben von Immobilien*. In: Beratende Ingenieure (Heft 11) ,1995, S. 16-19
 - [13] Breidenstein, M.: *Neue Bauverfahren zur Aufweitung historischer Bahntunnel unter Betrieb*. In: Felsbau 25 (2007) Nr. 5, S. 148-152
 - [14] Breitenbücher, R.: *Baustofftechnik, Teil Stahl und Korrosion*. Lehrstuhl für Baustofftechnologie der Ruhr-Universität Bochum, Vorlesungsskript, 2003
 - [15] Brilon, W.; Lemke, K.: *Verkehrssicherheit in Straßentunneln*. In: Bauingenieur (79), 2004, S. 286-290
 - [16] Bundesanstalt für Straßenwesen: *RI-BWD-TU – Richtlinie für Bergwasserdränagesysteme von Straßentunneln*. Bergisch Gladbach, 2007
 - [17] Bundesanstalt für Straßenwesen: *Statistik zur Inbetriebnahme von Straßentunneln in Deutschland*. Übermittlung per E-Mail durch Herrn Dr. Heimbecher vom 15.11.2011, unveröffentlicht
 - [18] Bundesanstalt für Straßenwesen: *Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Straßentunneln in Bezug auf die bautechnischen Sicherheitsanforderungen der RABT*. Bergisch Gladbach: unveröffentlicht, 2004
 - [19] Bundesanstalt für Straßenwesen: *Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING), Teil 5 Tunnelbau*. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 2007
-

-
- [20] Bundesministerium der Justiz: *Bundesfernstraßengesetz (FStrG)*. Quelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/fstrg/BJNR009030953.html>, letzte Änderung vom 31. Juni 2009, abgerufen am 23. Juni 2012
- [21] Bundesministerium der Justiz: *Gesetz über den Ausbau der Bundesfernstraßen (Fernstraßenausbaugesetz - FStrAbG)*. Quelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/fstrausbaug/BJNR008730971.html>, letzte Änderung vom 09. Dezember 2006, abgerufen am 23. Juni 2012
- [22] Bundesministerium der Justiz: *Gesetz über den Bau und die Finanzierung von Bundesfernstraßen durch Private (Fernstraßenbauprivatfinanzierungsgesetz – FStrPrivFinG)*. Quelle: <http://www.gesetze-im-internet.de/fstrprivfing/index.html>, letzte Änderung vom 06. Januar 2006, abgerufen am 01. Juli 2012
- [23] Bundesministerium der Justiz: *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*. Quelle: http://www.gesetze-im-internet.de/gg/art_90.html, letzte Änderung vom 27. Juli 2010, abgerufen am 22. Juni 2012
- [24] Bundesministerium der Justiz: *Güterkraftverkehrsgesetz (GüKG)*. Quelle: http://www.gesetze-im-internet.de/g_kg_1998/, letzte Änderung vom 24. Februar 2012, abgerufen am 22. Juni 2012
- [25] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bekanntmachung der Neufassung der Richtlinien für die Ermittlung der Verkehrswerte (Marktwerte) von Grundstücken (Wertermittlungsrichtlinien – WertR 2006)*. In: Bundesanzeiger Nr. 108a, Köln, 2006
- [26] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Brücken und Tunnel der Bundesfernstraßen*. Köln: Deutscher Bundes Verlag, 2005-2010
- [27] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bundesverkehrswegeplan 2003*. Bonn, 2003
- [28] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Ergebnisse der Überprüfung der Bedarfspläne für die Bundesschienenwege und die Bundesfernstraßen*. Bonn, 2010
- [29] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Investitionsrahmenplanung 2011-2015 für die Verkehrsinfrastruktur des Bundes (Entwurf)*. Bonn, 2011
- [30] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Straßentunnel-Projekte*. Übermittlung per E-Mail (AZ.: L 23 - WO 15681) durch Herrn Friebe vom 21.11.2011, unveröffentlicht
- [31] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Verkehr in Zahlen 2009/2010*. Hamburg: DVV Media Group, 2009
- [32] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung – ABBV)*. In: Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 35. Bonn: Bundesanzeiger Verlag, 2010, S. 856-871
- [33] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 25/1998: Leitfaden für die Planungsentscheidung Einschnitt oder Tunnel*. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 1988
- [34] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: *Allgemeines Rundschreiben Straßenbau 6/2000: Verfahren für die Auswahl von Straßenquerschnitten in Tunneln*. Dortmund: Verkehrsblatt-Verlag, 2000
- [35] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: *PPP im Öffentlichen Hochbau, Band 1: Leitfaden*. Bonn, 2003
-

-
- [36] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: *Straßenquerschnitte in Tunneln*. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik (Heft 785), Bonn: Bundesdruckerei, 2000
- [37] Bundesministerium für Verkehr: *Zweiter Bericht über Schäden an Bauwerken der Bundesverkehrswege*. Bonn, 1996
- [38] Bundesrechnungshof: *Bundesfernstraßen – Bauen, Planen und Betreiben*. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2004
- [39] Bundesregierung: *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI)*. In: Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 53. Bonn: Bundesanzeiger Verlag, 2009, S. 2732-2809
- [40] Colditz, B.: *Nachrüstung von Tunneln – eine ständige Herausforderung*. In: Tagungsband zum Symposium Straßentunnel in Deutschland. Bundesanstalt für Straßenbau, Bergisch Gladbach, 2011, S. 3-5
- [41] Dauderer, M.: *Gifte im Alltag*. München: Verlag C.H. Beck, 2011
- [42] Degenhard, W.: *Risikominimierung durch Instandhaltung*. In: Tagungsband Technische Risiken – Bewertung und Versicherung. Köln, 1983, S. 611-617
- [43] 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
- [44] Deutsche Bahn AG: *Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten*. Frankfurt am Main, 2008
- [45] Deutsche Bundesstiftung Umwelt: *Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauverfahren zur Herstellung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen – Phase II*. Osnabrück, 2011
- [46] Deutscher Beton- und Bautechnik Verein e.V.: *SIVV-Handbuch – Schützen, Instandsetzen, Verbinden und Verstärken von Betonbauteilen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2008
- [47] Deutscher Bundestag: *Straßenbauberichte der Jahre 1975 bis 2006*. Bonn/Berlin, 1976-2007
- [48] Deutscher Bundestag: *Verkehrsinvestitionsberichte der Jahre 2007 bis 2010*. Berlin, 2009-2011
- [49] Deutsches Institut für Urbanistik: *Der kommunale Investitionsbedarf 2006 bis 2020 (Endbericht – Kurzfassung)*. Berlin, 2008
- [50] DIN 276-1: *Kosten im Bauwesen – Teil 1: Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2008
- [51] DIN 820-120: *Normungsarbeit – Teil 120: Leitfaden für die Aufnahme von Sicherheitsaspekten in Normen*. Berlin: Beuth-Verlag, September 2008
- [52] DIN 1076: *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung*. Berlin: Beuth Verlag, November 1999
- [53] DIN 18205: *Bedarfsplanung im Bauwesen*. Berlin: Beuth Verlag, April 1996
- [54] DIN 18960: *Nutzungskosten im Hochbau*. Berlin: Beuth Verlag, Februar 2008
- [55] DIN 31051: *Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag, Juni 2003
- [56] DIN 50035-1: *Begriffe auf dem Gebiet der Alterung von Materialien, Grundbegriffe*. Berlin: Beuth-Verlag, März 1989
- [57] DIN 67524-1: *Beleuchtung von Straßentunneln und Unterführungen – Teil 1: Allgemeine Güte Merkmale und Richtwerte*. Berlin: Beuth Verlag, Juli 2008
- [58] DIN EN 1990: *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2010
-

-
- [59] DIN EN 1992-1-1: *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*. Berlin: Beuth Verlag, Januar 2011
- [60] DIN EN 1997-1: *Eurocode 7: Entwurf Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln*. Berlin: Beuth-Verlag, September 2009
- [61] DIN EN 13306: *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2010
- [62] DIN EN ISO 13849-1: *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze*. Berlin: Beuth Verlag, Dezember 2008
- [63] Ehrenstein, G.W.: *Polymer-Werkstoffe – Struktur, Eigenschaften, Anwendung*. München: Carl Hanser Verlag, 1999
- [64] Eismann, K.: *Steigerung der Tunnelsicherheit durch Erneuerung der Tunnelsteuerung*. In: Tagungsband zu Innovation unter Tage (IUT), Gütersloh: Bauverlag, 2011, S. 75-82
- [65] Empelmann, M.; Heumann, G.: *Qualitätsmerkmale lebensdauerorientierter Brückenbauwerke*. In: Bauingenieur (84), 2009, S. 438-446
- [66] Europäisches Parlament und Europäischer Rat.: *Richtlinie 2004/54/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz*. In: Amtsblatt der Europäischen Union, 2004, S. L201/56-L201/76
- [67] Fabrycky, W.J.; Blanchard, B.S.: *Life-Cycle Cost and Economic Analysis*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991
- [68] Ferry, D.J.O.; Flanagan, A.: *Report 122: Life Cycle Costing – A Radical Approach*. London: Construction Industry Research and Information Association, 1991
- [69] Fleischer, J.; Wawerla, M.: *Verfügbarkeit im Lebenszyklus von Maschinen und Anlagen – Abschlussbericht*. Universität Karlsruhe (TH), Institut für Produktionstechnik, 2007
- [70] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Dokumentation von Straßentunneln*. Köln, 1996
- [71] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Merkblatt für die Kontrolle, Wartung und Pflege von Straßentunneln (M KWPT)*. Köln, 2011
- [72] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)*. Köln, 2006
- [73] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaues von Verkehrsflächen (RStO 01)*. Köln, 2001
- [74] Forschungsprojekt TUNCONSTRUCT – Technology Innovation in Underground Construction: *Deliverable D 4.4.2.2 – Report for Service Life Cost Model*, 2006
- [75] Frangopol, D.M.; Bocchini, P.: *Overview of recent accomplishments and challenges in life-cycle bridge engineering: emphasis on deterioration, maintenance, monitoring, and networks*. In: Proceedings of the 9th International Probabilistic Workshop, Braunschweig, 2011
- [76] Freibauer, B.: *Bemessungsgrundlagen für die Belüftung von Straßentunneln*. Schriftenreihe Straßenforschung (Heft 87). Wien: Forschungsgesellschaft für das Straßenwesen im Österreichischen Ingenieur- und Architekten-Verein, 1978
- [77] Gänßmantel, J.; Geburtig, G.; Schau, A.: *Sanierung und Facility Management – Nachhaltiges Bauinstandhalten und Bauinstandsetzen*. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag, 2005
- [78] *GEFMA 100-1: Facility Management – Grundlagen (Entwurf)*. Bonn: GEFMA e.V. Deutscher Verband für Facility Management, Juli 2004
-

- [79] GEFMA 220-1: *Lebenszykluskostenrechnung im FM – Einführung und Grundlagen (Entwurf)*. Bonn: GEFMA e.V. Deutscher Verband für Facility Management, Juni 2006
- [80] Gilchrist, A.; Allouche, E.N.: *Quantification of social costs associated with construction projects: state-of-the-art review*. In: *Tunnelling and Underground Space Technology* 20 (2005), S. 89-104
- [81] Girmscheid, G.; Dreyer, J.: *Public Private Partnership – Begriffliche Strukturierung und Modellbildung*. In: *Bauingenieur* (81), 2006, S. 99-109
- [82] Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Klein, Th.; Meinlschmidt, A.: *Versinterung von Tunnel drainagen – Mechanismen der Versinterungsentstehung*. In: *Bauingenieur* (78), 2003, S. 292-300
- [83] Girmscheid, G.; Gamisch, T.; Meinlschmidt, A. (2003). *Versinterung von Tunnel drainagen – Empfehlungen für die Instandhaltung von Tunneln*. In: *Bauingenieur* (78), 2003, S. 562-570
- [84] Girmscheid, G.; Motzko, C.: *Kalkulation und Preisbildung in Bauunternehmen – Grundlagen, Methodik und Organisation*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [85] Götze, U.: *Investitionsrechnung – Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2008
- [86] Gralla, M.: *Baubetriebslehre – Bauprozessmanagement*. Köln: Werner Verlag, 2011
- [87] Graubner, C.-A.; Baumgärtner, U.; Fischer, O.; Haardt, P.; Knauff, A.; Putz, A.: *Nachhaltigkeitsbewertung für die Verkehrsinfrastruktur*. In: *Bauingenieur* (85), 2010, S. 331-340
- [88] Grob, H.L.: *Einführung in die Investitionsrechnung, Eine Fallstudiengeschichte*. München: Verlag Franz Vahlen, 2001
- [89] Günter, E.; Will, G.; Hoppe, H.: *Life Cycle Costing (LCC) und Life Cycle Assessment (LCA) – eine Übersicht bestehender Konzepte und deren Anwendung am Beispiel von Abwasserpumpstationen*. Technische Universität Dresden, Professur für Betriebswirtschaftslehre, 2006
- [90] Haack, A.; Schäfer, M.: *Detailtabellen laufende Tunnelbauvorhaben 2010/2011 bzw. Detailtabellen geplante Tunnelbauvorhaben (Baubeginn ab 2011)*. Quelle: <http://www.stuva.de/tunnelbau-bautechnik/tunnelstatistik.html>, abgerufen am 11. Juni 2012
- [91] Haack, A.; Schäfer, M.: *Tunnelbau in Deutschland: Statistik (2010/2011), Analyse und Ausblick*. In: *Tunnel* 8/2011, S. 28-41
- [92] Haardt, P.: *Vom schadensbasierten zum zuverlässigkeitsorientierten Erhaltungsmanagement von Brückenbauwerken der Bundesfernstraßen*. In: *Tagungsband zum SFB 477-Abschluss-Symposium*, Braunschweig, 2010, S. 11-16
- [93] Haardt, P.; Gehrlicher, K.; Prehn, W.: *Bauwerks-Management-System (BMS) – Werkzeug zur Substanzerhaltung für Verkehrsbauwerke*. In: *Bautechnik* 81 (2004), Heft 10, S. 794-798
- [94] Hauptmanns, U.; Werner, W.: *Engineering Risks. Evaluation and Valuation*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991
- [95] Herzog, K.: *Der Weg einer Immobilie zur Nachhaltigkeitszertifizierung – Ein Erfahrungsbericht aus der Praxis*. In: *Tagungsband zum 1. Internationalen BBB-Kongress*, Dresden, 2011, S. 195-200
- [96] Herzog, K.: *Lebenszykluskosten von Baukonstruktionen – Entwicklung eines Modells und einer Softwarekomponente zur ökonomischen Analyse und Nachhaltigkeitsbeurteilung von Gebäuden*. Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau, Dissertation, 2005
- [97] Hewicker, H.; Cremers, H.: *Modellierung von Zinsstrukturkurven*. In: *Working Paper Series (No. 165)*, Frankfurt: Frankfurt School of Finance and Management, 2011
- [98] Hoffmann, K.: *Der Produktlebenszyklus – Eine kritische Analyse*. Freiburg: Rombach, 1972
-

-
- [99] Hofmann, A.; Leitner, K.: *Der geschlossene Finanzierungskreislauf – Ansätze zur direkten Nutzerfinanzierung der Fernstraßeninfrastruktur in Deutschland*. In: Bauingenieur (87), 2012, S. 60-64
- [100] Holst, J.: *Optimization of operation and maintenance activities and costs for road tunnels based on experience*. In: Proceedings of First Eastern European Tunnelling Conference, Budapest, 2012
- [101] Hufnagel, W.; Meßmann, A.: *Der vollständige Finanzplan im Kontext der Methoden der Investitionsrechnung*. In: Verwaltungsrundschau 3/2002, S. 80-85
- [102] Ireland, M.; Bigger, J.: *LED migration*. In: Tunnels & Tunneling North America October/November 2011, S. 30-31
- [103] Irsch, N.; Grabow, B.: *KfW Kommunalpanel 2010*. Frankfurt am Main, 2010
- [104] *ISO/FDIS 15686-5: Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 5: Life-cycle costing*. Genf: International Organization for Standardization, 2008
- [105] Jodl, H.G.: *Lebenszykluskosten von Brücken – Teil 1: Berechnungsmodell LZKB*. In: Bauingenieur (85), 2010, S. 221-230
- [106] Jodl, H.G.: *Lebenszykluskosten von Brücken – Teil 2: Software LZKB*. In: Bauingenieur (85), 2010, S. 231-240
- [107] Kalusche, W.: *Lebenszykluskosten von Gebäuden – Grundlage ist die neue DIN 18960: 2008-02, Nutzungskosten im Hochbau*. In: Bauingenieur (83), 2008, S. 495-501
- [108] Khoury, A.: *EU tunnel fire safety action*. In: Tunnels & Tunneling International April 2003, S. 20-23
- [109] Kishk, M.; Al-Hajj, A.; Pollock, R.; Aouad, G.; Bakis, N.; Sun, M.: *Whole life costing in construction – A state of the art review*. London: RICS Foundation, 2003
- [110] Klingenberger, J.: *Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden*. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich für Bauingenieurwesen und Geodäsie, Dissertation, 2007
- [111] Knetsch, T.: *Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Dissertation, 2003
- [112] Knight, F.: *Risk, Uncertainty and Profit*. Chicago: University of Chicago Press, 1971
- [113] Knoll, E.: *Der Elsner – Handbuch für Straßen- und Verkehrswesen*. Dieburg: Otto Elsner Verlags-gesellschaft, 2011
- [114] Kordina, K.: *Planung unterirdischer Verkehrsanlagen gegen Brandgefahren*. In: Tunnel 5/2004, S. 9-20
- [115] Krug, K.E.: *Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung*. Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Fachbereich für Bau- und Vermessungswesen, Dissertation, 1985
- [116] Kruschwitz, L.: *Investitionsrechnung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2009
- [117] Kuhl, D.; Meschke, G.; Krimpmann, S.; Kruschwitz, J.: *Der Beton lebt – Computersimulationen prognostizieren die Lebensdauer von Betontragwerken*. In: Deutsches Ingenieur Blatt, 07-08.2009, S. 16-20.
- [118] Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrichtlinien (KVR-Leitlinien)*. Berlin: Kulturbuchverlag, 2003
- [119] Leismann, F.; Leucker, R.: *Application of life-cycle-cost models for the optimization of maintenance costs in tunnels*. In Proceedings of ITA–AITES World Tunnel Congress, Budapest, 2009
- [120] Leucker, R.; Kratzmeir, S.: *Brandversuche zu Wasserdampf-Brandbekämpfungsanlagen*. In: Tunnel 8/2011, S. 42-55
-

-
- [121] Littwin, F.; Cablitz, R.; Singer, S.: *Leitfaden Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen bei PPP-Projekten*. Düsseldorf, 2007
- [122] Lüder, K.: *Vom Ende der Kameralistik*. In: Speyerer Vorträge (Heft 74), Deutsche Hochschule für Verwaltungswissenschaften Speyer, 2003
- [123] Marettek, C.; Dörschell, A.; Hellenbrand, A.: *Kommunales Vermögen richtig bewerten*. München: Rudolf Haufe Verlag, 2006
- [124] Mayer, P.-M.; Franzius, J.N.: *Thermische Berechnungen im Tunnelbau*. In: Geotechnik 33 (2010) Nr. 2, S. 145-151
- [125] Möller, B.; Reuter, U.: *Uncertainty Forecasting in Engineering*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2007
- [126] Möller, D.; Kalusche, W.: *Planungs- und Bauökonomie – Band 1: Grundlagen der wirtschaftlichen Bauplanung*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2007
- [127] Müller, H.; Vogel, M.: *Lebenszyklusmanagement im Betonbau*. In: Beton 5/2008, S. 206-214
- [128] Müller, S.; Vogel, M.: *Lebensdauerprognose für Betonbrücken – Wo stehen wir heute?* In: Tagungsband zum 19. Dresdner Brückenbau Symposium, 2009, S. 1-22
- [129] Ocker, D.: *Unschärfe Risikoanalyse strategischer Ereignisrisiken*. Frankfurt am Main: Peter Lang Internationaler Verlag der Wissenschaften, Dissertation, 2010
- [130] Osebold, R.: *Abbruch von Massivbauwerken – Verfahren, Wirtschaftlichkeit*. Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, Dissertation, 1981
- [131] Peil, U.; Hosser, D.: *Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung*. In: Tagungsband zum Kolloquium Sonderforschungsbereich 477, Braunschweig, 2000, S. 1-12
- [132] Pelzeter, A.: *Lebenszykluskosten von Immobilien*. Köln: Rudolf Müller, Dissertation, 2006
- [133] Pelzeter, A.: *Ursache und Wirkung – Beeinflussung der Lebenszykluskosten eines Gebäudes durch seine Gestaltung*. In: Facility Management 5/2005, S. 37-40
- [134] Petschacher, M.: *Probabilistic ageing model for infrastructure buildings*. In: Structure and Infrastructure Engineering Vol. 5, No. 4, August 2009, S. 295-300
- [135] PIARC – Committee Road Tunnel Operation: *Good practice for the operation and maintenance of road tunnels*. La Défense cedex: World Road Association, 2005
- [136] PIARC – Technical Committee C3.3 Road Tunnel Operation: *Urban Road Tunnels recommendations to managers and operating bodies for design, management, operation and maintenance*. La Défense cedex: World Road Association, 2008
- [137] PIARC – Technical Committee C.4 Road Tunnel Operations: *Life cycle aspects of electrical road tunnel equipment*. La Défense cedex: World Road Association, 2012
- [138] Plate, E.: *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Berlin: Ernst & Sohn, 1993
- [139] Poggensee, K.: *Investitionsrechnung, Grundlagen – Aufgaben – Lösungen*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2011
- [140] Richter, D.: *Allgemeine Geologie*. Berlin: de Gruyter, 1992
- [141] Ritter, F.: *Lebensdauer von Bauteilen und Baustoffen – Modellierung und praxisnahe Prognose*. Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt, Dissertation, 2011
-

- [142] Rottke, N.; Wernecke, M.: *Lebenszyklus von Immobilien*. In: Schulte, K.-W.: *Immobilienökonomie – Band 1: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005
- [143] Rudloff, R.; Schwarz, J.: *Modul- und Prozessmodell zur Berechnung der Lebenszyklusrendite von Bauwerken*. In: *Bauingenieur* (83), 2008, S. 379-387
- [144] Sandoval-Wong, J.A.: *Development of a risk based decision analysis system for project management in construction projects*. Universität der Bundeswehr München, Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb (Band Nr. 2), München: Verlag Dr. Hut, Dissertation, 2012 (in Vorbereitung)
- [145] Schach, R.; Otto, J.; Häupel, H.; Fritzsche, M.: *Lebenszykluskosten von Brückenbauwerken*. In: *Bauingenieur* (81), 2006, S. 343-350
- [146] Schröter, N.: *Der Lebenszykluskostenansatz im Bundesfernstraßenbau*. In: Liebchen, J.; Viering, M.; Zanner, C.: *Baumanagement und Bauökonomie*. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag / GWV Fachverlage, 2007, S. 50-61
- [147] Schub, A.; Stark, K.: *Life Cycle Cost von Bauobjekten – Methoden zur Planung von Erst- und Folgekosten*. In: Schriftenreihe der Gesellschaft für Projektmanagement, Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1985
- [148] Seifert, W.; Preussner, M.: *Baukostenplanung*. Köln: Werner Verlag, 2009
- [149] Stangenberg, F.: *Lifetime-Oriented Structural Design Concepts*. Berlin: Springer-Verlag, 2009
- [150] Statistisches Bundesamt: *Verbraucherpreisindizes für Deutschland, Fachserie 17, Reihe 7*. Quelle: www.destatis.de, abgerufen am 12. Juni 2011
- [151] Staudt, E.; Kriegesmann, B.; Thomzik, M.: *Facility Management – Der Kampf um Marktanteile beginnt*. Frankfurt: Frankfurter Allgemeine Buch Verlag, 1999
- [152] Straub, D.: *Zuverlässigkeit und Lastannahmen*. Fachbereich Risikoanalyse und Zuverlässigkeit, Technische Universität München, Vorlesungsunterlagen Wintersemester 2010/11
- [153] Straube, E.; Beckedahl, H.: *Straßenbau und Straßenerhaltung – Ein Handbuch für Studium und Praxis*. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1997
- [154] Thewes, M.; Heimbecher, F.: *Research for civil security in Germany, Protection of road tunnels and bridges*. In: Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress, Budapest, 2009
- [155] Thewes, M.; Heimbecher, F.; Vollmann, G.: *Facility management methods for an improved serviceability of traffic tunnels and their application to tunnel drainage problems*. In: Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress, Prague: Taylor & Francis Group, 2007, S. 1759-1764
- [156] Thewes, M.; Kamarianakis, S.; Bielecki, R.: *Bewertung von offenen und geschlossenen Bauweisen – Eine Analyse unter Berücksichtigung multikriterieller Entscheidungsverfahren*. In: *BI Umweltbau* Nr. 3, 2011, S. 40-49
- [157] Thewes, M.; Vogt, P.: *Die Lebenszykluskosten von Tunnelbauwerken – Ausgangsbasis zur Bewertung der Vorteilhaftigkeit von Bauplanungs- und Betriebskonzepten*. In: Tagungsband zum 2. Forschungssymposium der Baubetriebs- und Immobilienwissenschaften, München, 2010, S. 317-337
- [158] Thewes, M.; Vogt, P.: *The Life-Cycle Philosophy of Underground Traffic Infrastructure – Approaches for a Sustainable Accounting and the Visualization of Costs*. In: Proceedings of International Conference and Exhibition on Tunnelling and Trenchless Technology, Kuala Lumpur, 2011, S. 129-138
- [159] Tilgner, R.: *Zuverlässigkeitsphysik - ein wichtiger Forschungsbereich zur Minimierung von Ausfällen in technischen Systemen*. In: *Physik in unserer Zeit*, 18. Jhg. 1987, Nr. 4, S. 106-113
- [160] VDI 2884: *Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing*. Düsseldorf: Beuth-Verlag, 2005
-

-
- [161] Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen: *Bericht zu Arbeitspaket 2 – Maßnahmenanalyse*, 2009, unveröffentlicht
- [162] Verbundprojekt SKRIBT – Schutz kritischer Brücken und Tunnel im Zuge von Straßen: *Verfahren zur Identifizierung kritischer Bauwerke (Entwurf)*, 2011, unveröffentlicht
- [163] Verkehrsverbund Rhein-Ruhr: *Neue Finanzierungswege für den ÖPNV*. In: *Spectrum* (1), 2010, S. 12-13
- [164] Vogt, P., & Thewes, M.: *The calculation of life-cycle costs for road tunnels under the influence of uncertainties*. Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, October 3-6, 2012, Wien (in print)
- [165] Vogt, P.; Thewes, M.: *New Life-cycle Cost Model for Road Tunnels Considering Technical and Financial Uncertainties*. In: *Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress*, Bangkok, 2012
- [166] Vogt, P.; Thewes, M.: *PPP Road Tunnel Projects and the Role of the Life-Cycle Cost Approach*. In: *Proceedings of International Symposium on Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works*, Athens, 2012
- [167] Weber, B.; Alfen, H.: *Infrastrukturinvestitionen – Projektfinanzierung und PPP*. Köln: Bank-Verlag Medien, 2009
- [168] Welte, U.: *Life Cycle Aspects of Electrical Road Tunnel Equipment*. In: *Routes/Roads* 2011 – No. 350, S. 76-79
- [169] Werner, U.; Pastor, W.: *Der Bauprozess*. Düsseldorf: Werner Verlag, 2002
- [170] Wilde, J.: *Testverfahren und Qualifikationen – Methoden des Qualitäts- und Zuverlässigkeitsmanagements*. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik, Skriptum zur Vorlesung. 2005
- [171] Wöhe, G.; Döring, U.: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. München: Verlag Franz Vahlen, 2002
- [172] Wübbenhorst, K.: *Konzept der Lebenszykluskosten*. Rechts- und Wirtschaftswissenschaften der Technischen Hochschule Darmstadt, Darmstadt: Verlag für Fachliteratur, Dissertation, 1984
-

9 Anlagen

Anlage 1: Durchführung der Weibullanalyse für KOMP.01

Anlage 2.1: Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ für Modelltunnel (Referenzzeitpunkt 1995)

Anlage 2.2: Eingabemaske Modultabelle „Asphalt“ (Referenzzeitpunkt 1995)

Anlage 2.3: Eingabemaske Modultabelle „Kamera“ (Referenzzeitpunkt 1995)

Anlage 3.1: Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ für Modelltunnel (Referenzzeitpunkt 2012)

Anlage 3.2: Eingabemaske Modultabelle „Rinne“ (Referenzzeitpunkt 2012)

Anlage 3.3: Eingabemaske Modultabelle „Rechner“ (Referenzzeitpunkt 2012)

Anlage 4.1: Entwicklung der Kapitalwerte für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 1995)

Anlage 4.2: Entwicklung der Kapitalwerte für alle Komponenten (Referenzzeitpunkt 1995)

Anlage 4.3: Entwicklung der Kapitalwerte für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 2012)

Anlage 4.4: Entwicklung der Kapitalwerte für alle Komponenten (Referenzzeitpunkt 2012)

Anlage 5.1: Entwicklung Folgekostenindex für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 1995)

Anlage 5.2: Entwicklung Folgekostenindex für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 2012)

Anlage 1: Durchführung der Weibullanalyse für KOMP.01

1. Eingabe der Beobachtungswerte t_i [d]

i	t_i [d]	F(t_i) nach Formel 4.18	HS ₁	HS ₂	$x_i > 50\%$ [d]		$x_i < 50\%$ [d]		HP _{1,o}	HP _{2,o}	HP _{3,o}	HP _{1,u}	HP _{2,u}	HP _{3,u}
1	1.366	0,0565	1	1366	0		1366	1366		1366			1366	
2	1.991	0,1371	1	1991	0		1991	1991		1991			1991	
3	2.056	0,2177	1	2056	0		2056	2056		2056			2056	0,2546
4	2.415	0,2984	1	2415	0		2415	2415		2415		2415		
5	2.656	0,3790	1	2656	0		2656	2656		2656		2656		
6	2.836	0,4597	1	2836	0		2836	2836		2836		2836		
7	2.896	0,5403	1	2896	2896	2896	0			2896		2896		
8	3.415	0,6210	1	3415	3415	3415	0			3415		3415		
9	3.671	0,7016	1	3671	3671	3671	0			3671		3671		
10	3.946	0,7823	1	3946	3946	3946	0			3946	0,7932	3946		
11	4.827	0,8629	1	4827	4827	4827	0		4827			4827		
12	5.636	0,9435	1	5636	5636	5636	0		5636			5636		

Erläuterungen: HS = Hilfsspalte, HP = Hilfsprüfung

2. Nebenrechnung

arithm. Mittel: $x_{0,50\%} = 4.065,167$ nach Formel 4.22
 $x_{u,50\%} = 2.220,000$ nach Formel 4.20

Ausfallwahrscheinlichkeit: $F(x_{0,50\%}) = 0,7932$ nach Formel 4.23
 $F(x_{u,50\%}) = 0,2546$ nach Formel 4.21

Ermittlung Weibullparameter: $t_1 = x_{u,50\%} = 2220,000$ $x_1 = F(x_{u,50\%}) = 0,2546$
 $t_2 = x_{0,50\%} = 4065,167$ $x_2 = F(x_{0,50\%}) = 0,7932$

$\ln(1-x_1) = -0,29381098$
 $\ln(t_1) = 7,70526247$
 $\ln(1-x_2) = -1,57584052$
 $\ln(t_2) = 8,31021002$

T = 3450,96037 nach Formel 4.23
b = 2,8 nach Formel 4.25

3. Ergebnis

Dichtefunktion: $f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{2,8}{3.450,96} \cdot \left(\frac{t}{3.450,96}\right)^{2,8-1} \cdot e^{-\left(\frac{t}{3.450,96}\right)^{2,8}}$ (vgl. Formel 4.5)

Ausfallwahrscheinlichkeit: $F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{3.450,96}\right)^{2,8}}$ (vgl. Formel 4.6)

Zuverlässigkeitsfunktion: $R(t) = e^{-\left(\frac{t}{3.450,96}\right)^{2,8}}$ (vgl. Formel 4.7)

Ausfallrate: $\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{2,8}{3.450,96} \cdot \left(\frac{t}{3.450,96}\right)^{2,8-1}$ (vgl. Formel 4.8)

Anlage 1: Durchführung der Weibullanalyse für KOMP.01 (Fortsetzung)**4. Bestimmung konkreter Ausfallzeitpunkte**

Berechnungsvorschrift: $t_A = 3.450,96 * e^{\left[\frac{\ln(-\ln(1-F(t)))}{2,8}\right]}$ (vgl. Formel 5.10)

F(t)	t _A [d]
0,010	667,5
0,020	856,5
0,030	991,8
0,050	1.194,7
0,100	1.544,9
0,150	1.803,5
0,200	2.019,7
0,250	2.211,5
0,400	2.714,9
0,500	3.027,6
0,550	3.184,5
0,623	3.450,6 = T
0,750	3.878,0
0,800	4.090,3
0,900	4.648,4
0,990	5.954,1

Anlage 2.1: Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ für Modelltunnel (Referenzzeitpunkt 1995)

Angaben zum Tunnelbauwerk

(optionale Eingabe, nicht für die Berechnung erforderlich)

Name des Tunnels	Modelltunnel
Anzahl der Röhren	1 Stück
Name Röhre 1	West-Ost-Röhre
Länge Röhre 1	1.470 m
Name Röhre 2	
Länge Röhre 2	m
Name Röhre 3	
Länge Röhre 3	m

Angaben für die Durchführung der Lebenszykluskostenanalyse

Beginn der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk (Referenzzeitpunkt!)	Jahresende	1995	Jahre
		70	Jahre

Preissteigerungsfaktoren
(Veränderungsraten pro Jahr)

	unten	mittel	oben
a) Verbraucherpreisindex	1,50	2,75	4,00
b) Preisindex für gewerbliche Produkte	1,00	3,00	5,00
c) Preisindex Straßenbau	0,00	2,00	4,00
d) Preisindex Brücken im Straßenbau	1,00	2,50	4,00
e) Preisindex Maschinenbau und elektrische Erzeugnisse	0,00	1,25	2,50
f) Preisindex Strom an gewerbliche Anlagen	2,50	5,00	7,50

Kapitalzinssätze mit Sensitivitätsintervall

unten	2,00	% p.a.
mittel	3,00	% p.a.
oben	5,00	% p.a.

Komp.-Nr.	Name
1	Portal
2	Tu-Quer1
3	Tu-Quer2
4	Decke
5	Stollen
6	Schacht
7	BW-West
8	BW-Ost
9	BW-Luft
10	LöWa
11	AbWa
12	Rinne
13	Asphalt
14	Klappe
15	Ventilator
16	Pumpe
17	Hydrant
18	Notruf
19	Licht1
20	Licht2
21	Messung
22	Kamera
23	Funk
24	B-kabel
25	B-melder
26	Rechner
27	Strom
28	L-sprecher
29	Schild
30	NA-Tür
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	
40	

Anlage 2.2: Eingabemaske Modultabelle „Asphalt“ (Referenzzeitpunkt 1995)**Dateneingabe (teilweise Übernahme aus Modultabelle "Tunnelkonfiguration")**

Komponente	j Name (s. auch Register)	13 Asphalt
Beginn der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk (Referenzzeitpunkt)	Jahresende	1995
Ende der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk	Jahresende	2065
Zeitpunkt zur Anrechnung der Initialkosten / Beginn der Berücksichtigung von Erlösen	Jahresende	1995
Anzahl der baugleich errichteten Komponenten (bei Erlösen immer $s_j = 1$)	s_j , wobei $s_j \in \mathbb{N}$	1,0 Stück
Theoretische Nutzungsdauer der Komponente (bei Erlösen immer $a_j = 1$)	a_j , wobei $a_j \in \mathbb{N}$	20,0 Jahre
Resultierende Anzahl an Komponentenaustauschvorgängen (q_j beinhaltet die Erstinstallation) bzw. Anzahl der Jahre, in denen Erlöse zu berücksichtigen sind	q_j , wobei $q_j \in \mathbb{N}$	4 OK
1. Initialkosten / Erlöse bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten w_j bzw. Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Erlöse w^g , wobei w^g ein negativer Wert ist!	w_j bzw. w^g	0,00 %
Initialkosten $C_{i,j}$ (negativ) bzgl. Referenzzeitpunkt bzw. Erlöse G (positiv) bzgl. Referenzzeitpunkt	$C_{i,j}$ bzw. G	-1.249.500,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist ($m = \text{medium}$)	$C_{i,j}^m = C_{i,j}$ $G^m = G$	-1.249.500,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario ($d = \text{disadvantageous}$)	$C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$ $G^d = (1 + w^g) * G$	-1.249.500,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios ($a = \text{advantageous}$)	$C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$ $G^a = (1 - w^g) * G$	-1.249.500,00 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Initialkosten bzw. Erlöse (a,b,c,d,e,f)	x_i	c
2. Folgekostenanteil 1: Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. der Initialkosten; bildet die Komponente Erlöse ab, so ist $p_{o,j} = 0$ zu setzen	$p_{o,j}$	3,84 %
B.&F.-kosten mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{o,j}^m = p_{o,j} * C_{i,j}^m$	-47.980,80 €/Jahr
B.&F.-kosten nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{o,j}^d = p_{o,j} * C_{i,j}^d$	-47.980,80 €/Jahr
B.&F.-kosten des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{o,j}^a = p_{o,j} * C_{i,j}^a$	-47.980,80 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der B.&F.-kosten (a,b,c,d,e,f)	x_o	a
Faktorisierung der Energie- und Instandhaltungskosten? Bildet die Komponente Erlöse ab, so ist "nein" zu wählen!	ja/nein	nein
Faktor Energiekosten	$p_{e,j}$	0,00 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Energiekosten (a,b,c,d,e,f)	x_e	f
Faktor Instandhaltungskosten	$p_{m,j}$	3,84 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Instandhaltungskosten (a,b,c,d,e,f)	x_m	a
Kontrolle	$p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}$?	3,84 OK

Anlage 2.2 (Fortsetzung)

Lineare Steigerung der Instandhaltungskosten bei $a_j \geq 2$ Jahre? (der Faktor für Energie bleibt konstant!)	ja/nein	nein
Faktor für Routinereparaturen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme	$p_{m,j}$	3,84 %
Faktor für Routinereparaturen am Ende der theoretischen Nutzungsdauer	$p_{m,j} + g_{m,j}$	0,00 %

3. Folgekostenanteil 2: Austauschkosten nach Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer bzgl. Referenzzeitpunkt

Detailplanung für Komponentenaustausch? ("nein" → $e_{k,j}$ wird pauschal zu 100 % gesetzt) Bildet die Komponente Erlöse ab und sind Anpassungen zu berücksichtigen, dann "ja", sonst "nein"	ja/nein	ja
Austauschkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{r,j}^m = C_{i,j}^m = C_{i,j}$	-1.249.500,00 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{r,j}^d = C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$	-1.249.500,00 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{r,j}^a = C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$	-1.249.500,00 €/Jahr
Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Austauschkosten bzw. Erlöse (vgl. Initialkosten)	$x_c = x_i$	c
Bestimmung der Faktoren, die Auskunft über den Austauschgrad $e_{k,j}$ bzw. über den Erlösfaktor $e^g(t)$ geben	Jahresende	$e_{k,j}$ [%] bzw. $e^g(t)$ [%]
	2015	40,00
	2035	100,00
	2055	40,00

Anlage 2.3: Eingabemaske Modultabelle „Kamera“ (Referenzzeitpunkt 1995)**Dateneingabe (teilweise Übernahme aus Modultabelle "Tunnelkonfiguration")**

Komponente	j Name (s. auch Register)	22 Kamera
Beginn der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk (Referenzzeitpunkt)	Jahresende	1995
Ende der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk	Jahresende	2065
Zeitpunkt zur Anrechnung der Initialkosten / Beginn der Berücksichtigung von Erlösen	Jahresende	1995
Anzahl der baugleich errichteten Komponenten (bei Erlösen immer $s_j = 1$)	s_j , wobei $s_j \in \mathbb{N}$	28,0 Stück
Theoretische Nutzungsdauer der Komponente (bei Erlösen immer $a_j = 1$)	a_j , wobei $a_j \in \mathbb{N}$	15,0 Jahre
Resultierende Anzahl an Komponentenaustauschvorgängen (q_j beinhaltet die Erstinstallation) bzw. Anzahl der Jahre, in denen Erlöse zu berücksichtigen sind	q_j , wobei $q_j \in \mathbb{N}$	5 OK
1. Initialkosten / Erlöse bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten w_j bzw. Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Erlöse w^g , wobei w^g ein negativer Wert ist!	w_j bzw. w^g	0,00 %
Initialkosten $C_{i,j}$ (negativ) bzgl. Referenzzeitpunkt bzw. Erlöse G (positiv) bzgl. Referenzzeitpunkt	$C_{i,j}$ bzw. G	-7.500,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist ($m = \text{medium}$)	$C_{i,j}^m = C_{i,j}$ $G^m = G$	-7.500,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario ($d = \text{disadvantageous}$)	$C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$ $G^d = (1 + w^g) * G$	-7.500,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios ($a = \text{advantageous}$)	$C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$ $G^a = (1 - w^g) * G$	-7.500,00 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Initialkosten bzw. Erlöse (a,b,c,d,e,f)	x_i	d
2. Folgekostenanteil 1: Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. der Initialkosten; bildet die Komponente Erlöse ab, so ist $p_{o,j} = 0$ zu setzen	$p_{o,j}$	3,70 %
B.&F.-kosten mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{o,j}^m = p_{o,j} * C_{i,j}^m$	-277,50 €/Jahr
B.&F.-kosten nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{o,j}^d = p_{o,j} * C_{i,j}^d$	-277,50 €/Jahr
B.&F.-kosten des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{o,j}^a = p_{o,j} * C_{i,j}^a$	-277,50 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der B.&F.-kosten (a,b,c,d,e,f)	x_o	a
Faktorisierung der Energie- und Instandhaltungskosten? Bildet die Komponente Erlöse ab, so ist "nein" zu wählen!	ja/nein	ja
Faktor Energiekosten	$p_{e,j}$	2,20 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Energiekosten (a,b,c,d,e,f)	x_e	f
Faktor Instandhaltungskosten	$p_{m,j}$	1,50 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Instandhaltungskosten (a,b,c,d,e,f)	x_m	a
Kontrolle	$p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}?$	3,70 OK

Anlage 2.3 (Fortsetzung)

Lineare Steigerung der Instandhaltungskosten bei $a_j \geq 2$ Jahre? (der Faktor für Energie bleibt konstant!)	ja/nein	nein
Faktor für Routinereparaturen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme	$p_{m,j}$	1,50 %
Faktor für Routinereparaturen am Ende der theoretischen Nutzungsdauer	$p_{m,j} + g_{m,j}$	0,00 %

3. Folgekostenanteil 2: Austauschkosten nach Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer bzgl. Referenzzeitpunkt

Detailplanung für Komponentenaustausch? ("nein" → $e_{k,j}$ wird pauschal zu 100 % gesetzt) Bildet die Komponente Erlöse ab und sind Anpassungen zu berücksichtigen, dann "ja", sonst "nein"	ja/nein	ja
Austauschkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{r,j}^m = C_{i,j}^m = C_{i,j}$	-7.500,00 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{r,j}^d = C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$	-7.500,00 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{r,j}^a = C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$	-7.500,00 €/Jahr
Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Austauschkosten bzw. Erlöse (vgl. Initialkosten)	$x_c = x_i$	c
Bestimmung der Faktoren, die Auskunft über den Austauschgrad $e_{k,j}$ bzw. über den Erlösfaktor $e^g(t)$ geben	Jahresende	$e_{k,j}$ [%] bzw. $e^g(t)$ [%]
	2010	80,00
	2025	80,00
	2040	100,00
	2055	80,00

Anlage 3.1: Modultabelle „Tunnelkonfiguration“ für Modelltunnel (Referenzzeitpunkt 2012)

Angaben zum Tunnelbauwerk
(optionale Eingabe, nicht für die Berechnung erforderlich)

Name des Tunnels	Modelltunnel
Anzahl der Röhren	1 Stück
Name Röhre 1	West-Ost-Röhre
Länge Röhre 1	1.470 m
Name Röhre 2	
Länge Röhre 2	m
Name Röhre 3	
Länge Röhre 3	m

Angaben für die Durchführung der Lebenszykluskostenanalyse

Beginn der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk (Referenzzeitpunkt!)	Jahresende	2012	Jahre
		53	Jahre

Preissteigerungsfaktoren
(Veränderungsraten pro Jahr)

	unten	mittel	oben
a) Verbraucherpreisindex	1,50	2,75	4,00
b) Preisindex für gewerbliche Produkte	1,00	3,00	5,00
c) Preisindex Straßenbau	0,00	2,00	4,00
d) Preisindex Brücken im Straßenbau	1,00	2,50	4,00
e) Preisindex Maschinenbau und elektrische Erzeugnisse	0,00	1,25	2,50
f) Preisindex Strom an gewerbliche Anlagen	2,50	5,00	7,50

Kapitalzinssätze mit Sensitivitätsintervall

unten	2,00	% p.a.
mittel	3,00	% p.a.
oben	5,00	% p.a.

Komp.-Nr.	Name
1	Portal
2	Tu-Quer1
3	Tu-Quer2
4	Decke
5	Stollen
6	Schacht
7	BW-West
8	BW-Ost
9	BW-Luft
10	LöWa
11	AbWa
12	Rinne
13	Asphalt
14	Klappe
15	Ventilator
16	Pumpe
17	Hydrant
18	Notruf
19	Licht1
20	Licht2
21	Flucht
22	Knopf
23	Messung
24	Kamera
25	Funk
26	B-kabel
27	B-melder
28	Rechner
29	Strom
30	L-sprecher
31	Schild
32	Schranke
33	NA-Tür
34	Nachrüstung
35	
36	
37	
38	
39	
40	

Anlage 3.2: Eingabemaske Modultabelle „Rinne“ (Referenzzeitpunkt 2012)**Dateneingabe (teilweise Übernahme aus Modultabelle "Tunnelkonfiguration")**

Komponente	j Name (s. auch Register)	12 Rinne
Beginn der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk (Referenzzeitpunkt)	Jahresende	2012
Ende der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk	Jahresende	2065
Zeitpunkt zur Anrechnung der Initialkosten / Beginn der Berücksichtigung von Erlösen	Jahresende	2012
Anzahl der baugleich errichteten Komponenten (bei Erlösen immer $s_j = 1$)	s_j , wobei $s_j \in \mathbb{N}$	1,0 Stück
Theoretische Nutzungsdauer der Komponente (bei Erlösen immer $a_j = 1$)	a_j , wobei $a_j \in \mathbb{N}$	20,0 Jahre
Resultierende Anzahl an Komponentenaustauschvorgängen (q_j beinhaltet die Erstinstallation) bzw. Anzahl der Jahre, in denen Erlöse zu berücksichtigen sind	q_j , wobei $q_j \in \mathbb{N}$	3 OK
1. Initialkosten / Erlöse bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten w_j bzw. Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Erlöse w^g , wobei w^g ein negativer Wert ist!	w_j bzw. w^g	2,00 %
Initialkosten $C_{i,j}$ (negativ) bzgl. Referenzzeitpunkt bzw. Erlöse G (positiv) bzgl. Referenzzeitpunkt	$C_{i,j}$ bzw. G	-207.760,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist ($m = \text{medium}$)	$C_{i,j}^m = C_{i,j}$ $G^m = G$	-207.760,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario ($d = \text{disadvantageous}$)	$C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$ $G^d = (1 + w^g) * G$	-211.915,20 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios ($a = \text{advantageous}$)	$C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$ $G^a = (1 - w^g) * G$	-203.604,80 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Initialkosten bzw. Erlöse (a,b,c,d,e,f)	x_i	d
2. Folgekostenanteil 1: Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. der Initialkosten; bildet die Komponente Erlöse ab, so ist $p_{o,j} = 0$ zu setzen	$p_{o,j}$	9,30 %
B.&F.-kosten mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{o,j}^m = p_{o,j} * C_{i,j}^m$	-19.321,68 €/Jahr
B.&F.-kosten nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{o,j}^d = p_{o,j} * C_{i,j}^d$	-19.708,11 €/Jahr
B.&F.-kosten des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{o,j}^a = p_{o,j} * C_{i,j}^a$	-18.935,25 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der B.&F.-kosten (a,b,c,d,e,f)	x_o	a
Faktorisierung der Energie- und Instandhaltungskosten? Bildet die Komponente Erlöse ab, so ist "nein" zu wählen!	ja/nein	nein
Faktor Energiekosten	$p_{e,j}$	0,00 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Energiekosten (a,b,c,d,e,f)	x_e	f
Faktor Instandhaltungskosten	$p_{m,j}$	9,30 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Instandhaltungskosten (a,b,c,d,e,f)	x_m	a
Kontrolle	$p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}?$	9,30 OK

Anlage 3.2 (Fortsetzung)

Lineare Steigerung der Instandhaltungskosten bei $a_j \geq 2$ Jahre? (der Faktor für Energie bleibt konstant!)	ja/nein	ja
Faktor für Routinereparaturen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme	$p_{m,j}$	9,30 %
Faktor für Routinereparaturen am Ende der theoretischen Nutzungsdauer	$p_{m,j} + g_{m,j}$	1,00 %

3. Folgekostenanteil 2: Austauschkosten nach Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer bzgl. Referenzzeitpunkt

Detailplanung für Komponentenaustausch? ("nein" → $e_{k,j}$ wird pauschal zu 100 % gesetzt) Bildet die Komponente Erlöse ab und sind Anpassungen zu berücksichtigen, dann "ja", sonst "nein"	ja/nein	ja
Austauschkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{r,j}^m = C_{i,j}^m = C_{i,j}$	-207.760,00 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{r,j}^d = C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$	-211.915,20 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{r,j}^a = C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$	-203.604,80 €/Jahr
Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Austauschkosten bzw. Erlöse (vgl. Initialkosten)	$x_c = x_i$	d
Bestimmung der Faktoren, die Auskunft über den Austauschgrad $e_{k,j}$ bzw. über den Erlösfaktor $e^g(t)$ geben	Jahresende	$e_{k,j}$ [%] bzw. $e^g(t)$ [%]
	2032	96,90
	2052	96,90

Anlage 3.3: Eingabemaske Modultabelle „Rechner“ (Referenzzeitpunkt 2012)**Dateneingabe (teilweise Übernahme aus Modultabelle "Tunnelkonfiguration")**

Komponente	j Name (s. auch Register)	28 Rechner
Beginn der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk (Referenzzeitpunkt)	Jahresende	2012
Ende der LZK-Betrachtung für das gesamte Tunnelbauwerk	Jahresende	2065
Zeitpunkt zur Anrechnung der Initialkosten / Beginn der Berücksichtigung von Erlösen	Jahresende	2012
Anzahl der baugleich errichteten Komponenten (bei Erlösen immer $s_j = 1$)	s_j , wobei $s_j \in \mathbb{N}$	1,0 Stück
Theoretische Nutzungsdauer der Komponente (bei Erlösen immer $a_j = 1$)	a_j , wobei $a_j \in \mathbb{N}$	8,0 Jahre
Resultierende Anzahl an Komponentenaustauschvorgängen (q_j beinhaltet die Erstinstallation) bzw. Anzahl der Jahre, in denen Erlöse zu berücksichtigen sind	q_j , wobei $q_j \in \mathbb{N}$	7 OK
1. Initialkosten / Erlöse bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Initialkosten w_j bzw. Faktor zur Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Erlöse w^g , wobei w^g ein negativer Wert ist!	w_j bzw. w^g	1,00 %
Initialkosten $C_{i,j}$ (negativ) bzgl. Referenzzeitpunkt bzw. Erlöse G (positiv) bzgl. Referenzzeitpunkt	$C_{i,j}$ bzw. G	-138.530,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist ($m = \text{medium}$)	$C_{i,j}^m = C_{i,j}$ $G^m = G$	-138.530,00 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario ($d = \text{disadvantageous}$)	$C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$ $G^d = (1 + w^g) * G$	-139.915,30 €/Jahr
Initialkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios ($a = \text{advantageous}$)	$C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$ $G^a = (1 - w^g) * G$	-137.144,70 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Initialkosten bzw. Erlöse (a,b,c,d,e,f)	x_i	d
2. Folgekostenanteil 1: Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. Referenzzeitpunkt		
Faktor zur Berücksichtigung der Betriebs- und Funktionserhaltungskosten bzgl. der Initialkosten; bildet die Komponente Erlöse ab, so ist $p_{o,j} = 0$ zu setzen	$p_{o,j}$	19,90 %
B.&F.-kosten mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{o,j}^m = p_{o,j} * C_{i,j}^m$	-27.567,47 €/Jahr
B.&F.-kosten nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{o,j}^d = p_{o,j} * C_{i,j}^d$	-27.843,14 €/Jahr
B.&F.-kosten des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{o,j}^a = p_{o,j} * C_{i,j}^a$	-27.291,80 €/Jahr
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der B.&F.-kosten (a,b,c,d,e,f)	x_o	a
Faktorisierung der Energie- und Instandhaltungskosten? Bildet die Komponente Erlöse ab, so ist "nein" zu wählen!	ja/nein	ja
Faktor Energiekosten	$p_{e,j}$	14,30 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Energiekosten (a,b,c,d,e,f)	x_e	f
Faktor Instandhaltungskosten	$p_{m,j}$	5,60 %
Wahl Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Instandhaltungskosten (a,b,c,d,e,f)	x_m	a
Kontrolle	$p_{e,j} + p_{m,j} = p_{o,j}?$	19,90 OK

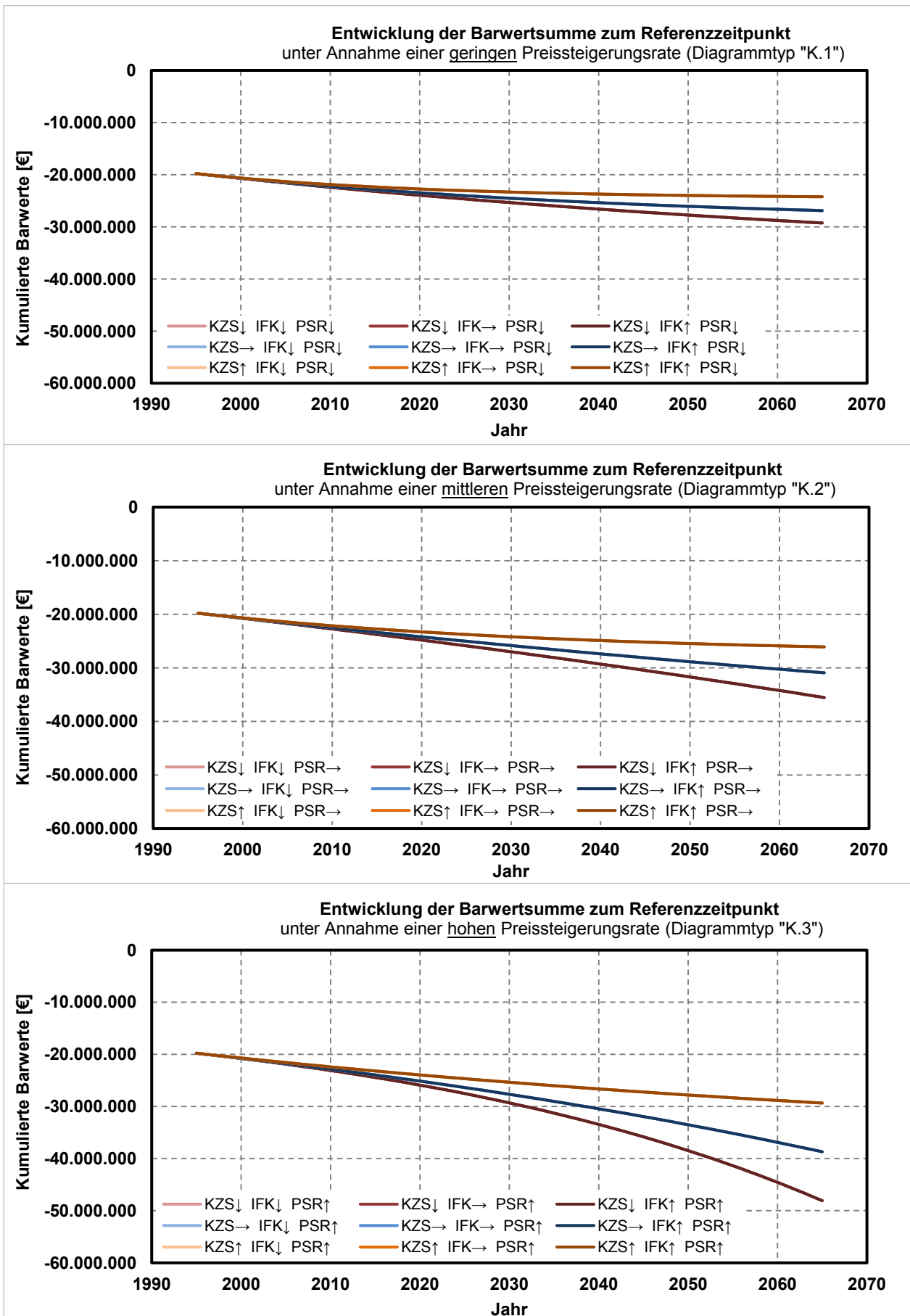
Anlage 3.3 (Fortsetzung)

Lineare Steigerung der Instandhaltungskosten bei $a_j \geq 2$ Jahre? (der Faktor für Energie bleibt konstant!)	ja/nein	nein
Faktor für Routinereparaturen zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme	$p_{m,j}$	5,60 %
Faktor für Routinereparaturen am Ende der theoretischen Nutzungsdauer	$p_{m,j} + g_{m,j}$	0,00 %

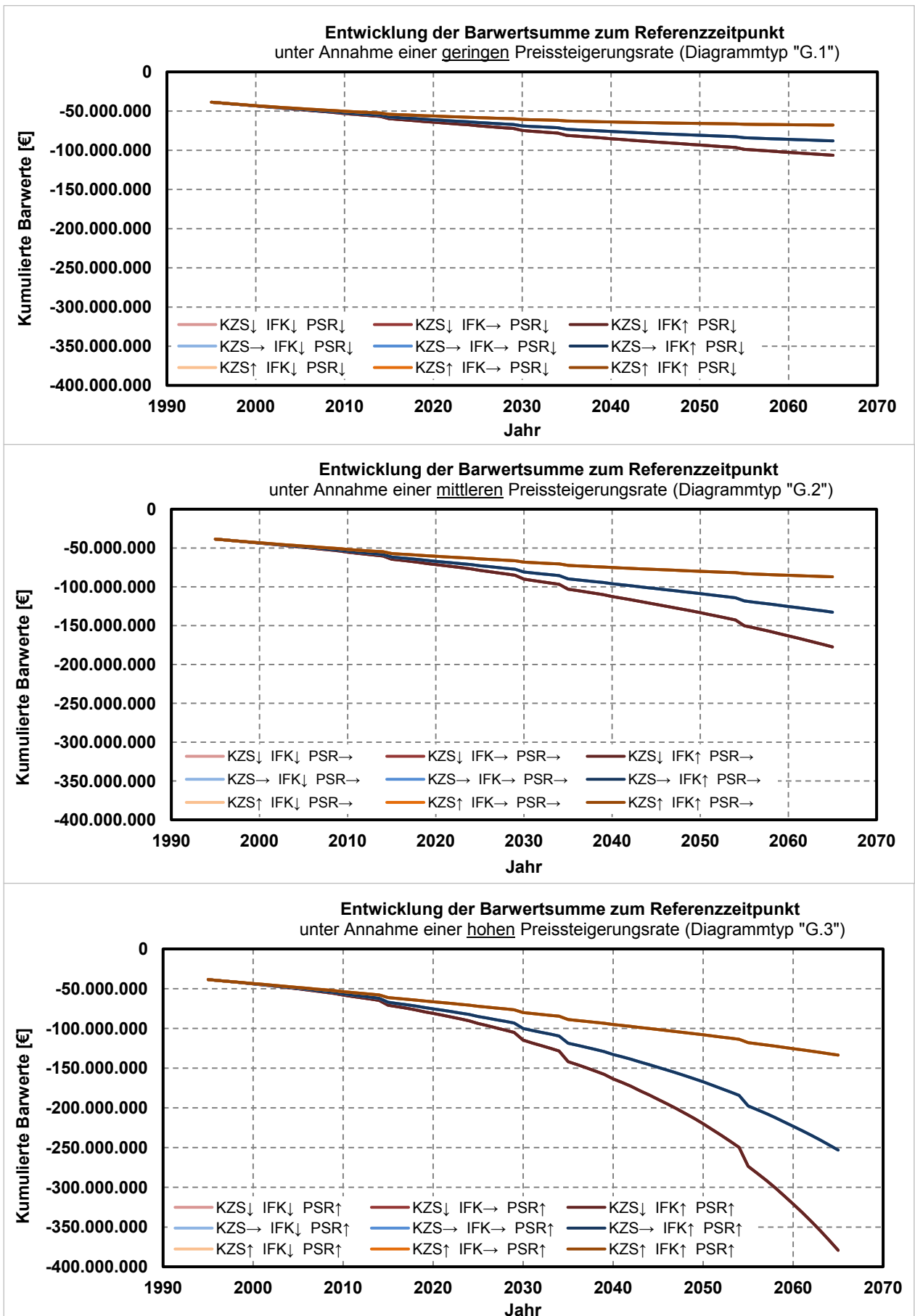
3. Folgekostenanteil 2: Austauschkosten nach Erreichen der theoretischen Nutzungsdauer bzgl. Referenzzeitpunkt

Detailplanung für Komponentenaustausch? ("nein" → $e_{k,j}$ wird pauschal zu 100 % gesetzt) Bildet die Komponente Erlöse ab und sind Anpassungen zu berücksichtigen, dann "ja", sonst "nein"	ja/nein	ja
Austauschkosten bzw. Erlöse mit denen die mutmaßlich größte Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist (medium)	$C_{r,j}^m = C_{i,j}^m = C_{i,j}$	-138.530,00 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse nach dem ungünstigsten Szenario (disadvantageous)	$C_{r,j}^d = C_{i,j}^d = (1 + w_j) * C_{i,j}$	-139.915,30 €/Jahr
Austauschkosten bzw. Erlöse des vermeintlich vorteilhaftesten Szenarios (advantageous)	$C_{r,j}^a = C_{i,j}^a = (1 - w_j) * C_{i,j}$	-137.144,70 €/Jahr
Preisindex zur Berücksichtigung der Preissteigerung der Austauschkosten bzw. Erlöse (vgl. Initialkosten)	$x_c = x_i$	d
Bestimmung der Faktoren, die Auskunft über den Austauschgrad $e_{k,j}$ bzw. über den Erlösfaktor $e^g(t)$ geben	Jahresende	$e_{k,j}$ [%] bzw. $e^g(t)$ [%]
	2020	93,40
	2028	93,40
	2036	93,40
	2044	93,40
	2052	93,40
	2060	93,40

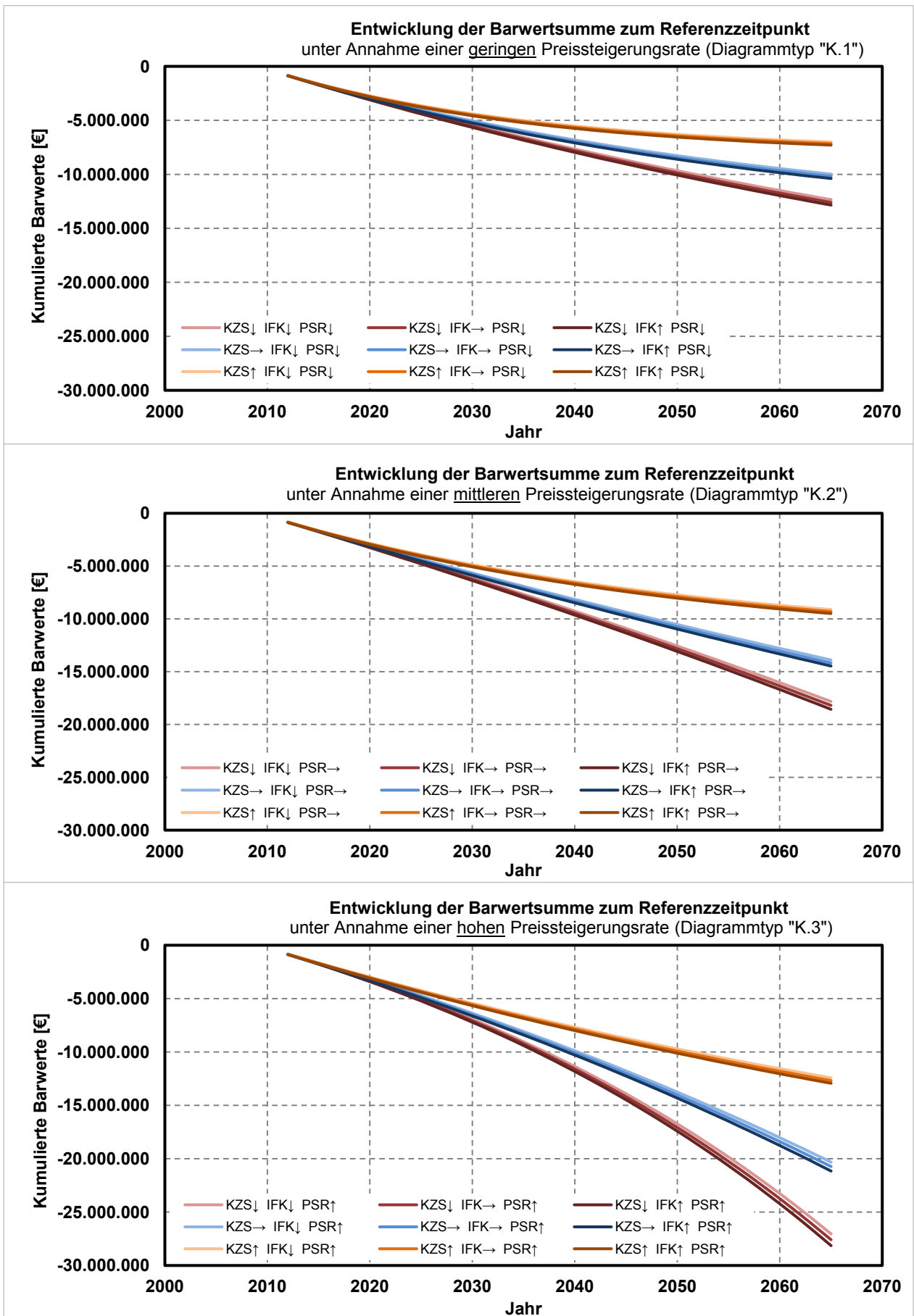
Anlage 4.1: Entwicklung der Kapitalwerte für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 1995)



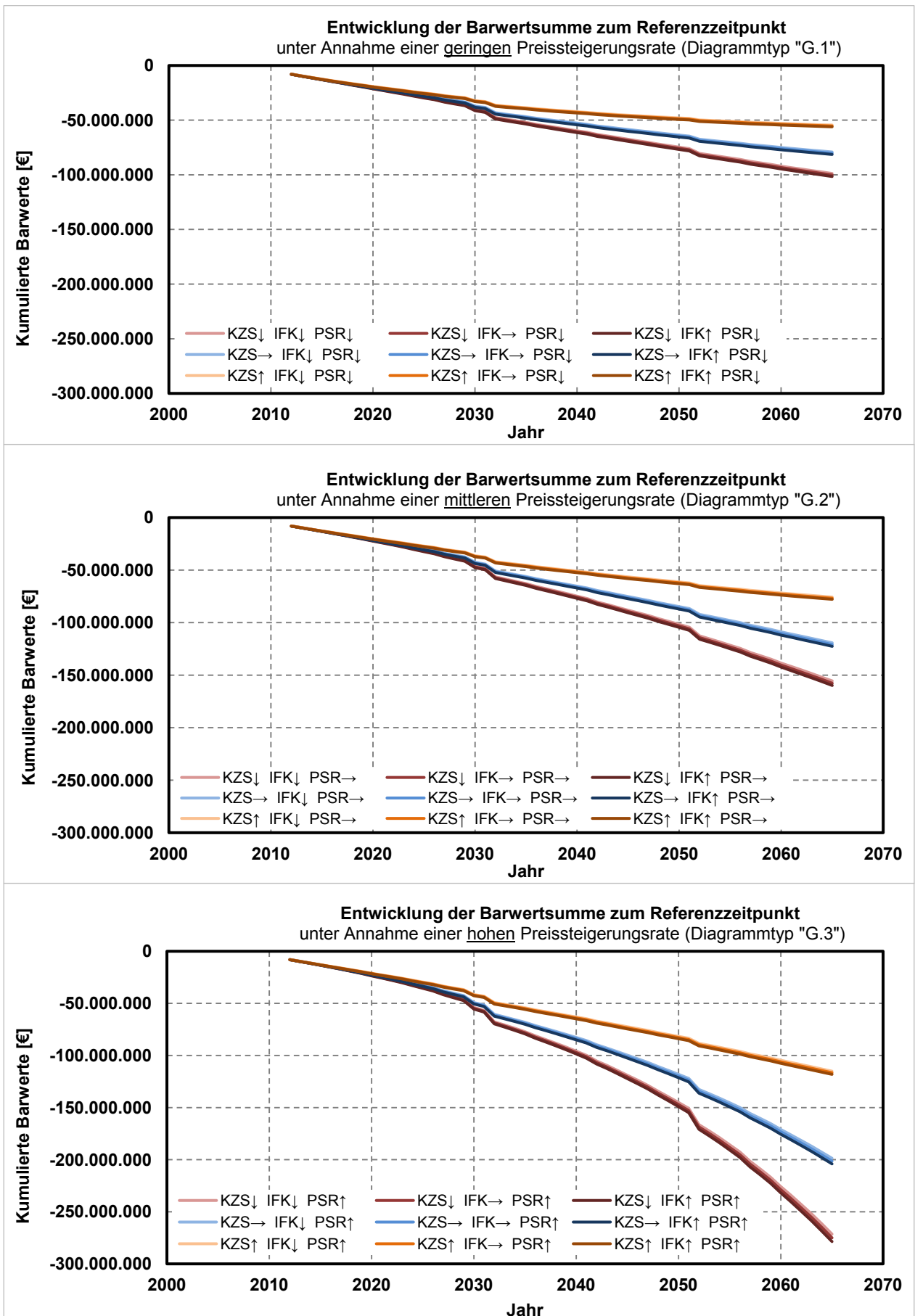
Anlage 4.2: Entwicklung der Kapitalwerte für alle Komponenten (Referenzzeitpunkt 1995)



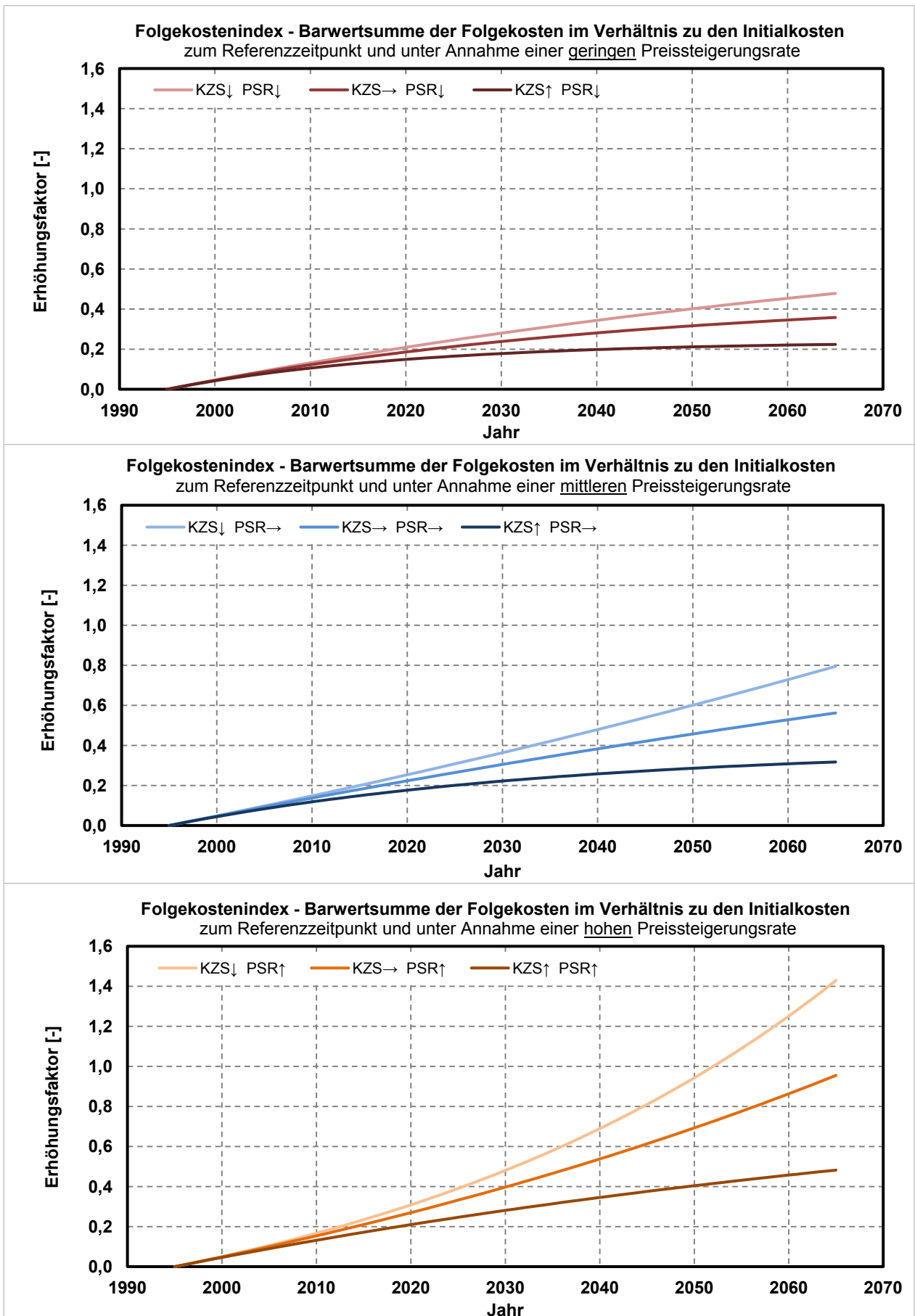
Anlage 4.3: Entwicklung der Kapitalwerte für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 2012)



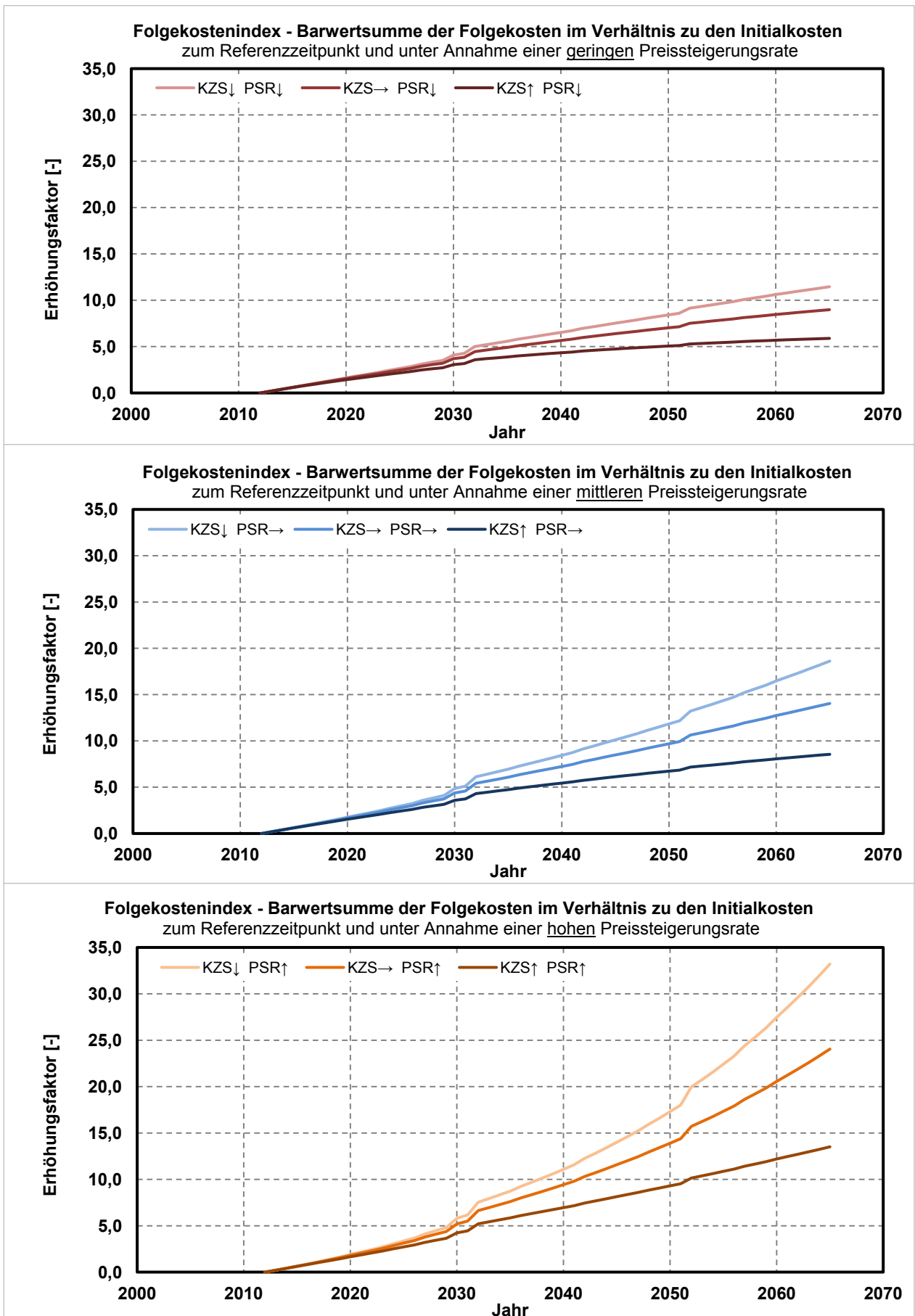
Anlage 4.4: Entwicklung der Kapitalwerte für alle Komponenten (Referenzzeitpunkt 2012)



Anlage 5.1: Entwicklung Folgekostenindex für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 1995)



Anlage 5.2: Entwicklung Folgekostenindex für die Komponente „Tu-Quer1“ (Referenzzeitpunkt 2012)



10 Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Vogt
Vorname: Peter
Titel: Dipl.-Ing.
Geburtsdatum: 30. November 1972
Geburtsort: Bochum
Familienstand: verheiratet, 3 Kinder
Kontakt: peter.vogt@web.de

Beruflicher Werdegang

seit April 2012 Alpine Bau Deutschland AG
Niederlassung Industrie- und Kraftwerksbau, Dortmund

April 2008 – März 2012 Ruhr-Universität Bochum,
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb
Lehrstuhlinhaber: Prof. Dr.-Ing. Markus Thewes

Juni 2000 – März 2008 HOCHTIEF Construction AG
Abteilung Consult Infrastructure, Essen

Studium

Oktober 1993 – April 2000 Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
Diplomstudiengang Bauingenieurwesen
Abschluss: Dipl.-Ing.

August 1996 – Juni 1997 University of Massachusetts, Amherst, USA
Stipendium des Landes Baden-Württemberg für das
„Department of Civil and Environmental Engineering“