

TIM ZINKE

# Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken

Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter  
besonderer Berücksichtigung externer Effekte



Tim Zinke

## **Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken**

Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte

BAND 4

Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine  
Berichte zum Stahl- und Leichtbau

# Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken

Ganzheitliche Bewertung von Autobahnbrücken  
unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte

von  
Tim Zinke

**Karlsruher Institut für Technologie**  
**Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine**

Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken – Ganzheitliche Bewertung von  
Autobahnbrücken unter besonderer Berücksichtigung externer Effekte

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
von der Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Tim Zinke aus Kiel

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Januar 2016

Referent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Dipl. Wirt.-Ing. Martin Mensinger

**Impressum**



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark of Karlsruhe  
Institute of Technology. Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 DE License  
(CC BY-SA 3.0 DE): <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>*



*The cover page is licensed under the Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 3.0 DE License (CC BY-ND 3.0 DE):  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nd/3.0/de/>*

Print on Demand 2016

ISSN 2198-7912

ISBN 978-3-7315-0509-9

DOI: 10.5445/KSP/1000053695

## Vorwort

Brückenbauwerke werden unter Mitwirkung einer Vielzahl an Personen geplant, gebaut und betrieben. Dies ist eine sehr treffende Analogie zu der vorliegenden Dissertation, deren Entstehung von vielen Personen beeinflusst wurde.

Im Rahmen der Planungsphase von Brücken übernimmt das *Planungsteam* die Verantwortung für den Bauwerksentwurf. Ich bin meinem hervorragenden Planungsteam sehr verbunden, das mich im Rahmen des Forschungsprojekts „NaBrü“ bei der Datenerhebung, methodischen Fragestellungen und der Lösung von Problemen während der gesamten Bearbeitungszeit unterstützt hat. In erster Linie möchte ich hier Philippa Maier (Universität Stuttgart), Marjolaine Pfaffinger (Technische Universität München) und Karl-Heinz Friedrich (Bundesanstalt für Straßenwesen) nennen und danken.

Manchmal ist ein *Perspektivenwechsel* eine inspirierende Quelle für neue Ideen. Mein Auslandsaufenthalt im Jahr 2011 an der Lehigh University, Pennsylvania, USA hat mir neue Denkanstöße für den Umgang mit streuenden Parametern sowie das Themengebiet der Resilienz gegeben und Einblicke in das angelsächsische Hochschulsystem ermöglicht. Vor allem für die Unterstützung und Zusammenarbeit mit den Professoren Dan M. Frangopol und Paolo Bocchini bin ich sehr dankbar, genauso wie für das vom Karlsruhe House for Young Scientists (KHYS) bereitgestellte Stipendium.

*Fachplaner* sind Spezialisten auf ihrem Gebiet und sorgen dafür, dass Detailfragen qualifiziert beantwortet und Brücken den Vorschriften entsprechend errichtet werden. Insbesondere Walter Streit (Büchting+Streit AG), Alfred Krill (Ingenieurgruppe Bauen) und Uwe Willberg (Autobahndirektion Südbayern) haben mit ihrer Hilfsbereitschaft und ihrem Praxiswissen dazu beigetragen, fachgerechte Berechnungsansätze in die Arbeit einfließen zu lassen.

Eine wichtige Rolle bei der Begutachtung der Bauwerksauslegung sowie der Qualitätskontrolle spielen *Prüfingenieure*. Die Mitglieder meiner Promotionskommission und meine Prüfer waren die Professoren Hans Joachim Blaß, Kunibert Lennerts, Martin Mensinger und Thomas Ummenhofer, denen ich für die Teilnahme an dem Verfahren sowie ihren zeitlichen Einsatz ganz herzlich danke. Professor Martin Mensinger (Technische Universität München) hat mich bereits viele Jahre im Thema Brückenbewertung begleitet und

sich als Korreferent der Dissertation im Detail angenommen. Mein Doktorvater Thomas Ummerhofer hat es geschafft, mich für das Thema zu begeistern, mir ein kreatives und forderndes Arbeitsumfeld bereit zu stellen und mich immer zu unterstützen. Vielen Dank für die inspirierende und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

*Bauleiter* übernehmen Verantwortung für das Tagesgeschäft, müssen immer wieder flexibel reagieren und Probleme ausbügeln. Die Bauleiter meiner Promotionsbaustelle waren meine Kollegen, die ich in meiner Zeit in Braunschweig am Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk und dann später in Karlsruhe an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine kennenlernen durfte. Ich möchte allen Kollegen für die schöne, gemeinsame Zeit und die inhaltliche sowie emotionale Unterstützung ganz herzlich danken.

Natürlich muss auch an die *Autofahrer* gedacht werden, die die mit Brücken in Verbindung stehenden Baustellen meistens mit Geduld und bei Stau mit einem gelegentlichen Fluchen durchfahren. Hier möchte ich vor allem meine Eltern Jutta und Henning und meine Schwester Anna hervorheben, die die Promotionsbauarbeiten teilweise mit einem staunenden Blick und (sehr selten) mit einem Kopfschütteln verfolgt haben.

Abschließend braucht es manchmal eine gute Fee, die Menschen und Prozesse begleitet und in schwierigen Momenten einen kleinen Zauberspruch parat hat. Meine persönliche gute Fee war und ist meine Frau Barbara, die mich unermüdlich angespornt, manchmal einen Schubs in die richtige Richtung gegeben und mir unglaublich viele Freiheiten ermöglicht hat. Ich bin froh, Barbara an meiner Seite zu haben.



## Kurzfassung

Brücken sind ein wichtiger Teil unserer Verkehrsinfrastruktur und ihre Funktionsfähigkeit ist Grundvoraussetzung für Mobilität und Warenverkehr. Die starke Interaktion zwischen Brücken und Verkehrsteilnehmern kann bei Baumaßnahmen allerdings zu negativen volkswirtschaftlichen Auswirkungen führen. Muss beispielsweise ein Fahrstreifen zur Instandsetzung eines Brückenmittelpfeilers gesperrt werden, kann es durch die Kapazitätsreduzierung einer unter der Brücke verlaufenden Autobahn zu Verkehrsstaus kommen. Als Folge entstehen Zeitverluste bei den Straßennutzern, die Schadstoffemissionen nehmen bei Stop-and-go-Fahrweise zu und es kommt zu einer Veränderung der Unfallhäufigkeit. Bei auf der Brücke verlaufenden Straßen führen Brückensperrungen, die beispielsweise beim Austausch von Fahrbahnübergängen oder einer Fahrbahnerneuerung erforderlich sind, zu Umleitungen und damit zu Mehrkilometern.

Die geschilderten Zusammenhänge und die zunehmende Bedeutung von Nachhaltigkeitsaspekten beim Bau und Betrieb von Brücken bilden die Grundlage für Überlegungen, wie zukünftige Nachhaltigkeitsbewertungssysteme aussehen können. Für eine ganzheitliche Analyse müssen Aspekte wie die ökonomische und ökologische Leistungsfähigkeit im gesamten Lebenszyklus sowie Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Verkehr in Form von externen Effekten in die Entscheidungsfindung mit einbezogen werden. In dieser Arbeit wird ein Schwerpunkt auf genau diese Aspekte gelegt. Deshalb wird eine Methodik zur Berechnung von baustelleninduzierten externen Effekten entwickelt, um die Auswirkungen zwischen dem ungestörten Normalbetrieb und kapazitätsreduzierten Verkehrsführungen im Fall von Baustellen zu quantifizieren. Hierdurch findet eine deutliche Ausweitung der Systemgrenzen gegenüber den im Hochbau üblichen Nachhaltigkeitsbewertungen statt und es wird deutlich, dass für Infrastrukturen eine im Vergleich zu Hochbauten unterschiedliche Bewertungssystematik verwendet werden muss.

Auch die Berechnungen der Lebenszykluskosten, potentiellen Umweltwirkungen, dargestellt in einer Ökobilanz, und die durchgeführten Unsicherheitsanalysen basieren vollständig auf Modellen, so dass bei einer Änderung von Eingangsparametern die Veränderung der Ergebnisse quantifiziert und die Leistungsfähigkeit verschiedener Untersuchungsvarianten beurteilt werden kann. Um die Entstehung von Scheingenauigkeiten zu vermeiden, ist eine detaillierte Bestimmung der Eingangsparameter notwendig. Vor

allein die Erneuerungszyklen verschiedener Brückenbauteile, sich daraus ergebende Instandhaltungsstrategien, verschiedene Referenzbrücken, unterschiedliche Autobahnsituationen und zur Überführung von externen Effekten in externe Kosten zu verwendende Monetarisierungsansätze werden diskutiert und passende Eingangswerte abgeleitet.

Hohe Brücken-Vorfertigungsgrade sowie aufeinander abgestimmte Instandhaltungsmaßnahmen führen aufgrund der damit einhergehenden Bauzeitenminimierung zu einer deutlichen Reduzierung der externen Kosten entstehend durch Verkehrsbeeinträchtigungen. Eine praktische Umsetzung kann zum Beispiel durch die Errichtung von Integralbrücken oder die Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Brückenbauteilen erfolgen. So kann eine Reduzierung der externen Kosten um 12 % bis 15 % erreicht werden, wenn die Stahlverbundträger einer 45 m langen Integralbrücke nicht mit einer Korrosionsschutzbeschichtung, sondern feuerverzinkt oder in WT-Stahl ausgeführt werden. Dieser prozentuale Unterschied kann abhängig von der zu Grunde liegenden Verkehrssituation schwanken. Bei Pendlerautobahnen mit einem durchschnittlichen täglichen Verkehr von 100.000 Fahrzeugen ergeben sich deutlich höhere externe Kosten als bei einer Landautobahn mit einer Verkehrsbelastung von 40.000 Fahrzeugen pro Tag. Eine Bewertung muss daher immer standortgebunden erfolgen.

Bei der Analyse der bauwerksbezogenen Kosten zeigt sich, dass Herstellungskosten mit einem Anteil von durchschnittlich 70 % an den Lebenszykluskosten eine deutlich größere Bedeutung für das Gesamtergebnis haben, als dies im Hochbau der Fall ist. Allerdings können die Lebenszykluskosten bei Anwendung unterschiedlicher Instandhaltungsstrategien bis zu 30 % Abweichung aufweisen.

Insgesamt führen die durchgeführten Untersuchungen zu dem Schluss, dass existierende Nachhaltigkeitsbewertungssysteme des Hochbaus nicht ohne Weiteres auf Infrastrukturbawerke übertragbar sind. Speziell für Straßenbrücken spielt die standortspezifische Beeinflussung des Verkehrs bei Baumaßnahmen eine große Rolle. Es werden dabei sowohl externe Kosten als auch externe Umweltwirkungen erzeugt, die in der Größenordnung der bauwerksbezogenen Lebenszykluskosten bzw. Ökobilanzierungsergebnisse liegen. Je nach Gestaltung eines multikriteriellen Bewertungssystems können externe Effekte dabei einen erheblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis ausüben. Die vorliegenden Erkenntnisse können bei der Entwicklung einer brückenspezifischen Bewertungssystematik helfen, die Diskussion hierzu muss allerdings unter Einbeziehung von Baupraktikern, Behörden und Ministerien erfolgen. Darüber hinaus erzeugen die durchgeführten modellgestützten Szenarioanalysen ein Gespür für Ergebnisgrößenordnungen und können von Ingenieuren und öffentlichen Auftraggebern als Vergleichswerte genutzt werden.

## Abstract

Bridges are an important part of our transport infrastructure and their functional capability is a basic requirement for mobility and transport of goods. However, the strong interaction between bridges and road users may lead to negative economic impacts arising during construction measures. If, for example, a lane must be closed due to repair of a central bridge pillar, the reduction of capacity can produce traffic jams on the highway underneath. Hereby, time losses of the road users occur, the pollutant emissions increase with stop-and-go driving and accident frequency changes. Bridge closures that are for example necessary for the replacement of expansion joints or road surface renewals cause detours and therefore additional kilometers.

The depicted interrelations and the growing significance of sustainability aspects during construction and operation of bridges provide a basis for considerations how sustainability assessment systems may be organized in the future. For a holistic analysis, aspects like the economic and environmental performance during the entire life-cycle as well as interactions between bridges and traffic arising in form of externalities need to be involved in the decision-making process. This thesis focuses on exactly these aspects. Therefore, a methodology for calculating site-induced externalities is developed to quantify the impact between an undisturbed normal operation and capacity reduced traffic routing. Because of this, a significant expansion of the system boundaries takes place compared to sustainability assessments common in building construction, and it becomes clear that for infrastructures a different evaluation approach has to be used compared to buildings.

The calculations of life-cycle costs (LCC), potential environmental impacts presented in a life-cycle assessment (LCA) and performed uncertainty analyses are entirely based on engineering models. As a result, in case of a modification of input parameters, the changes of the results can be quantified and an advantageousness of different planning variants can be assessed. A detailed determination of the input parameters is necessary to avoid the development of a spurious accuracy. In particular, the renewal cycles of various bridge components, consequential maintenance strategies, different reference bridges, different highway situations and the monetization rates used to transfer external effects into external costs are discussed and suitable input values are derived.

High levels of prefabrication of bridges and coordinated maintenance activities lead to a considerable reduction of external costs resulting from traffic disruptions due to an accompanied reduction of construction times. For example, a practical implementation can be achieved by erecting integral bridges (integral frame structure) or improving the durability of bridge components. Thus, a reduction of external costs by 12 % to 15 % can be achieved, if the composite steel girders of a 45 m long integral bridge are designed with a galvanization or built in weathering steel instead of using an organic corrosion protection. It should be noted that the external costs strongly depend on the underlying traffic conditions. Highways for commuters with an average daily traffic of 100,000 vehicles result in significantly higher external costs than countryside highways with a traffic load of 40,000 vehicles per day. Therefore, an assessment must always be made location bound.

When analyzing the structure-related costs it appears, that construction costs with an average share of 70 % of the life cycle costs have a significant higher importance for the overall result compared to office buildings. However, the life-cycle costs may vary up to 30 % when different maintenance strategies are applied.

Overall, the performed investigations lead to the conclusion that existing sustainability assessment systems of office and residential buildings cannot directly be applied to infrastructures. Especially for road bridges the site-specific influence on the traffic plays a significant role during construction activities. Traffic obstruction lead to both external costs and external environmental effects, which are in the same order of magnitude as the structure-related life-cycle costs and environmental life-cycle assessment results. Depending on the design of a multi-criteria assessment system, external effects can thus exert a significant influence on the overall result. The available findings can help to develop a bridge-specific assessment methodology. The discussion of the final assessment system must take place, however, with the involvement of practitioners, public authorities and governmental agencies. In addition, the conducted model-based scenario analyses generate a sense for the order of magnitude of different results and can be used by engineers, consultants and public clients as comparison figures.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XIX</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XXIII</b>
<b>Abkürzungs- und Symbolverzeichnis</b>	<b>XXVII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Aufgabenstellung .....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Aufbau .....	4
<b>2 Nachhaltigkeit</b>	<b>7</b>
2.1 Nationale und internationale Nachhaltigkeitsentwicklung .....	7
2.1.1 Historischer Abriss .....	7
2.1.2 Entwicklung im Hochbau .....	9
2.1.3 Entwicklung im Infrastrukturbereich .....	11
2.2 Methodik der Nachhaltigkeitsbewertung .....	12
2.2.1 Inhalte und Ziele .....	12
2.2.2 Indikatoren, Indikatorensysteme und Indizes .....	15
2.2.3 Analysemethoden .....	18
2.2.4 Gliederungssystematik .....	20
2.3 Nachhaltigkeitsanalysen von Infrastrukturen .....	22
2.3.1 Besonderheiten von Infrastrukturbawerken .....	23
2.3.2 Bestehende Bewertungsansätze .....	25
2.3.2.1 Marktorientierte Bewertungssysteme .....	25
2.3.2.2 Forschungsansätze .....	29
2.3.2.3 Normung .....	31
2.3.2.4 Richtlinien und Vorschriften .....	33
2.4 Definition Untersuchungsrahmen .....	34
2.4.1 Festlegung .....	34
2.4.2 Abgrenzung .....	37
2.4.3 Exkurs: Resilienz .....	39

<b>3</b>	<b>Externe Effekte</b>	<b>41</b>
3.1	Theoretische Grundlagen .....	41
3.1.1	Externe Effekte und externe Kosten .....	41
3.1.2	Historischer Abriss .....	43
3.1.3	Bestehende Untersuchungsansätze .....	44
3.1.4	Erhebungsverfahren .....	46
3.1.5	Gesamt-, Durchschnitts- und Grenzkosten .....	47
3.2	Methodische Anwendung .....	48
3.2.1	Elemente externer Kosten .....	48
3.2.2	Abgrenzung zur Kosten-Nutzen-Analyse .....	50
3.2.3	Externe Kosten und Ökobilanzierung .....	51
3.2.4	Diskontierung .....	53
3.3	Monetarisierungsansätze .....	55
3.3.1	Festlegungen .....	55
3.3.2	Verspätungskosten .....	57
3.3.3	Betriebskosten .....	58
3.3.4	Klimaerwärmung und Luftschadstoffe .....	60
3.3.5	Unfälle .....	61
3.3.6	Lärm .....	62
3.3.7	Landveränderung .....	63
3.3.8	Vor- und nachgelagerte Prozesse .....	63
3.3.9	Zusammenfassung .....	64
<b>4</b>	<b>Brückenlebenszyklus</b>	<b>67</b>
4.1	Analysegrundlagen .....	67
4.1.1	Bauteilgruppen .....	67
4.1.2	Degradation und Instandhaltungsstrategien .....	68
4.1.3	Referenz-Nutzungsdaueransätze .....	71
4.2	Realdatenanalyse .....	73
4.2.1	Datenbank SIB-Bauwerke .....	73
4.2.2	Datenqualität .....	74
4.2.3	Auswertungsmethodik .....	75
4.2.4	Ergebnisse Erhaltungszeiträume .....	76
4.2.5	Strategieentwicklung .....	79
4.3	Bauzeiten .....	82
4.3.1	Herstellungsphase .....	82
4.3.2	Nutzungsphase .....	83
4.3.3	Erhöhungsfaktoren .....	84

---

<b>5</b>	<b>Modellierung</b>	<b>87</b>
5.1	Verkehrsmodell .....	87
5.1.1	Modellklassifikation .....	87
5.1.2	Modellierung baustellenbedingter externer Effekte .....	88
5.1.3	Autobahntypen .....	91
5.1.4	Umsetzung und Einordnung .....	94
5.2	Lebenszykluskostenrechnung .....	95
5.2.1	Berechnungsmethodik .....	95
5.2.2	Eingangsdaten und Datenqualität .....	97
5.2.3	Systemgrenzen .....	98
5.2.4	Funktionales Äquivalent .....	99
5.3	Ökobilanzierung .....	99
5.3.1	Berechnungsmethodik .....	99
5.3.2	Eingangsdaten und Datenqualität .....	101
5.3.3	Systemgrenzen .....	102
5.3.4	Funktionales Äquivalent .....	103
5.4	Externe Kostenrechnung .....	103
5.4.1	Berechnungsmethodik .....	103
5.4.2	Eingangsdaten und Datenqualität .....	105
5.4.3	Systemgrenzen und funktionales Äquivalent .....	105
5.5	Unsicherheiten .....	106
5.5.1	Grundlagen .....	106
5.5.2	Analysemethoden .....	107
5.5.2.1	Szenarioanalysen .....	108
5.5.2.2	Monte-Carlo-Simulationen .....	108
5.5.2.3	Sensitivitätsanalysen .....	110
5.5.3	Abbildung von Unsicherheiten .....	111
<b>6</b>	<b>Anwendung</b>	<b>113</b>
6.1	Brückenbauwerke .....	113
6.2	Verkehrseffekte .....	117
6.3	A-Referenzbauwerke: Autobahn unten liegend .....	120
6.3.1	Ergebnisse externe Kostenrechnung .....	120
6.3.1.1	Ergebnisbeeinflussende Komponenten .....	120
6.3.1.2	Konstruktionsvergleiche .....	121
6.3.1.3	Instandhaltungsstrategien .....	124
6.3.1.4	Autobahntypen .....	126
6.3.1.5	Unsicherheiten .....	128

6.3.2	Ergebnisse Ökobilanzierung .....	136
6.3.2.1	Externe Umwelteffekte: Konstruktionsvergleiche .....	137
6.3.2.2	Externe Umwelteffekte: Autobahntypen.....	138
6.3.2.3	Bauwerksebene: Konstruktionsvergleiche .....	139
6.3.2.4	Bauwerksebene: Wirkungskategorien .....	141
6.3.3	Ergebnisse Lebenszykluskostenrechnung .....	142
6.3.3.1	Herstellungskosten .....	143
6.3.3.2	Lebenszykluskosten .....	144
6.3.3.3	Unsicherheiten .....	146
6.4	B- und C-Referenzbauwerke: Autobahn oben liegend .....	148
6.4.1	Ergebnisse externe Kostenrechnung .....	149
6.4.1.1	Ergebnisbeeinflussende Komponenten .....	149
6.4.1.2	Konstruktionsvergleiche .....	150
6.4.1.3	Instandhaltungsstrategien und Autobahntypen .....	152
6.4.1.4	Unsicherheiten .....	153
6.4.2	Ergebnisse Lebenszykluskostenrechnung .....	154
6.4.2.1	Herstellungskosten und Konstruktionsvergleiche .....	154
6.4.2.2	Instandhaltungsstrategien.....	156
6.5	Zusammenfassung .....	157
<b>7</b>	<b>Konzeptionelle Integration</b> .....	<b>159</b>
7.1	Integration externer und bauwerksbezogener Ergebnisse .....	159
7.1.1	Externe Kosten und Lebenszykluskosten .....	159
7.1.2	Externe Umwelteffekte und ökobilanzielle Ergebnisse .....	161
7.1.3	Diskussion .....	162
7.2	Multikriterielle Entscheidungsunterstützung .....	163
7.2.1	Grundlagen der Entscheidungstheorie.....	163
7.2.2	Anwendung im Bauwesen .....	165
7.2.3	Indikatorzusammenführung mit PROMETHEE.....	166
7.2.4	Autobahntypenvergleich mit PROMETHEE .....	171
<b>8</b>	<b>Fazit</b> .....	<b>173</b>
8.1	Erkenntnisse Anwendungsrechnungen .....	174
8.2	Methodische Erkenntnisse .....	175
8.3	Umsetzungsempfehlungen .....	176
8.4	Forschungsbedarf.....	177



<b>Anhang A: Glossar</b>	<b>179</b>
A.1 Begriffe zur Beschreibung des Lebenszyklus .....	180
A.2 Begriffe zur Beschreibung der Instandhaltung .....	181
A.3 Wirkungskategorien der Ökobilanzierung .....	182
<b>Anhang B: Vergleich bestehender Nachhaltigkeitsbewertungsansätze</b>	<b>185</b>
B.1 Marktorientierte Infrastrukturbewertungsansätze .....	186
B.2 Forschungsorientierte Infrastrukturbewertungsansätze .....	187
B.3 Indikatorensysteme für die Infrastrukturbewertung .....	188
B.4 Normative Infrastrukturbewertungsansätze .....	189
<b>Anhang C: Empirische Analyse Erhaltungszeiträume</b>	<b>191</b>
C.1 Ergebnisse Zweifeld-Balkenbrücken .....	192
C.2 Ergebnisse Mehrfeld-Hohlkastenbrücken .....	198
C.3 Ergebnisse Mehrfeldbrücken .....	200
C.4 Ergebnisse Verformungslager .....	204
C.5 Ergebnisse Stahllamellen-Fahrbahnübergänge .....	205
C.6 Ergebnisse Entwässerungen und Schutzeinrichtungen .....	206
<b>Anhang D: Definition von Bauzeiten und Verkehrsführungen</b>	<b>207</b>
D.1 A-Referenzbauwerke: 6-streifige Autobahn unten liegend .....	208
D.2 B-Referenzbauwerk: 4-streifige Autobahn oben liegend .....	219
D.3 C-Referenzbauwerk: 4-streifige Autobahn oben liegend .....	226
<b>Anhang E: Verkehrsmodell</b>	<b>233</b>
E.1 Grenzkapazitäten und Verkehrsaufkommen .....	234
E.2 Kapazitätsreduzierungen .....	242
E.3 Umleitungen .....	260
<b>Anhang F: Absolute Ergebnisse Ökobilanzierung</b>	<b>263</b>
F.1 Externe Umwelteffekte .....	264
F.2 Ökobilanzierung Brücken .....	267
<b>Anhang G: Indikatoren zur Infrastrukturbewertung</b>	<b>269</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>275</b>
<b>Normen- und Richtlinienverzeichnis</b>	<b>293</b>



## Abbildungsverzeichnis

1.1	Ergebnisse Suchabfrage Nachhaltigkeitsbegriffe .....	2
1.2	Auswirkungen von Brückenbaumaßnahmen auf den Verkehr .....	3
1.3	Kapitelzuordnung zu den Untersuchungsschwerpunkten .....	5
2.1	Meilensteine der Nachhaltigkeitsentwicklung .....	10
2.2	Meilensteine der Nachhaltigkeitsentwicklung für Infrastrukturbauwerke .....	12
2.3	Schutzziele der Technikbewertung nach VDI 3780 .....	13
2.4	Nachhaltigkeit und nachhaltige Entwicklung.....	14
2.5	Kriterienbaum zur Nachhaltigkeits-Indexerstellung .....	17
2.6	Methoden für Nachhaltigkeitsanalysen .....	19
2.7	Klassifikation des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung .....	21
2.8	Nachhaltigkeitsbewertungssysteme für Infrastrukturen und Gebäude .....	28
2.9	Normungsdokumente zum Thema Nachhaltigkeit von Bauwerken .....	32
2.10	Nachhaltigkeitsbewertung in verschiedenen Planungsphasen .....	35
2.11	Räumliche Abgrenzung von Brückennachhaltigkeitsanalysen .....	37
2.12	Vergleich der Konzepte nachhaltige Entwicklung und Resilienz .....	39
3.1	Private und soziale Grenzkosten.....	42
3.2	Externe Verkehrseffekte und ihre räumliche Wirkung .....	45
3.3	Methoden zur Bestimmung von Monetarisierungsansätzen .....	46
3.4	Mögliche Geschwindigkeitsprofile im Normal- und Baustellenbetrieb .....	48
3.5	Baustellenbedingte externe Kosten .....	49
3.6	Analyseschritte der Ökobilanzierung und der externen Kostenrechnung.....	52
3.7	Dichtefunktionen der Dreiecks-, Trapez- und Normalverteilung.....	56
3.8	Übersicht der zu verwendenden Monetarisierungsansätze .....	65
4.1	Bauteilgruppen für Instandhaltungsmaßnahmen.....	68
4.2	Degradationskurven zur Bestimmung von Erneuerungszyklen .....	69
4.3	Definition der zu untersuchenden Instandhaltungsstrategien .....	70
4.4	Jährliche Anzahl der Neubau- und Instandhaltungsmaßnahmen .....	74
4.5	Auswertungsablauf Realdatenanalyse Erhaltungszeiträume .....	75
4.6	Zusammenhang Datensätze und Boxplot-Lagemaße.....	76

4.7	Austausch eines Fahrbahnübergangs .....	77
4.8	Erhaltungszeiträume Fahrbahnübergangskonstruktionen Zweifeldbrücke .....	77
4.9	Erhaltungszeiträume Stahllamellen-Fahrbahnübergänge .....	78
4.10	Profillinien der Ergebnisse der Erhaltungszeiträume .....	80
4.11	Erneuerungszyklen der drei Instandhaltungsstrategien .....	81
4.12	Kombination von Instandhaltungsmaßnahmen im Lebenszyklus .....	84
4.13	Funktionsermittlung für die Bauzeitenerhöhung .....	86
5.1	Berechnungsablauf Verkehrsmodellierung .....	89
5.2	Stautentstehung im Bereich des Baustellenengpasses .....	90
5.3	Verengung einer 3-streifigen Autobahn im Baustellenbereich .....	91
5.4	Autobahntypen zur Abbildung repräsentativer Verkehrssituationen .....	92
5.5	Berechnungsablauf Lebenszykluskostenrechnung .....	97
5.6	Kostenkomponenten Whole-Life-Costs .....	98
5.7	Berechnungsablauf Ökobilanzierung .....	101
5.8	Berechnungsablauf externe Kostenrechnung .....	105
5.9	Berechnungsablauf Monte-Carlo-Simulation .....	109
6.1	Übersicht Referenzbrücken .....	114
6.2	Übersicht Szenarioanalysen .....	115
6.3	Situationsabhängige und stundengenaue externe Zeitkosten .....	117
6.4	Situationsabhängige und tagesgenaue externe Zeitkosten .....	118
6.5	Brückenabhängige und wochengenaue externe Zeitkosten .....	119
6.6	Brückenabhängige externe Zeitkosten im Lebenszyklus .....	119
6.7	Externe Kosten unterteilt nach Kostenarten und Sachverhalten .....	121
6.8	Konstruktionsvergleich externe Kosten nach Kostenarten .....	122
6.9	Konstruktionsvergleich externe Kosten nach Sachverhalten .....	123
6.10	Konstruktionsvergleich externe Kosten Korrosionsschutzsysteme .....	123
6.11	Externe Kosten von Instandhaltungsstrategien nach Sachverhalten .....	124
6.12	Externe Kosten von Instandhaltungsstrategien nach Brücken .....	125
6.13	Autobahnspezifische externe Kosten Brücke A1 nach Sachverhalten .....	126
6.14	Autobahnspezifische externe Kosten Brücke A1 nach Kostenarten .....	127
6.15	Autobahnspezifische externe Kosten nach Brücken .....	128
6.16	Konvergenzuntersuchungen Berechnungsmodell .....	129
6.17	Ergebnisunsicherheiten externe Kosten nach Sachverhalten .....	130
6.18	Ergebnisunsicherheiten externe Kosten mit Lageparametern .....	131
6.19	Spearmansche Rangkorrelationskoeffizienten Sachverhalt unten .....	132

---

6.20	Spearmansche Rangkorrelationskoeffizienten Sachverhalt oben .....	133
6.21	Korrelation der Eingangsvariablen für die globalen Sensitivitätsanalysen .....	135
6.22	Ergebnisunsicherheiten verschiedener Autobahntypen und Brücken .....	136
6.23	Externe Umwelteffekte, Konstruktionsvergleich für GWP .....	138
6.24	Externe Umwelteffekte, Autobahnvergleich für GWP .....	139
6.25	Bauwerksökobilanz, Konstruktionsvergleich für GWP .....	140
6.26	Bauwerksökobilanz, phasenbezogene Ergebnisse .....	141
6.27	Bauwerksökobilanz, baugruppenbezogene Ergebnisse .....	142
6.28	Herstellungskosten Konstruktionsvergleich .....	143
6.29	Lebenszykluskosten Brücke A1, Instandhaltungsstrategien .....	144
6.30	Lebenszykluskosten Brücke A2-V und A2-B, Instandhaltungsstrategien .....	145
6.31	Ergebnisunsicherheiten Lebenszykluskostenrechnung Brücke A1 .....	147
6.32	Ergebnisunsicherheiten Lebenszykluskostenrechnung .....	148
6.33	Externe Kosten Brücken B und C unterteilt nach Kostenarten .....	150
6.34	Konstruktionsvergleich externe Kosten, Ausführungsvarianten .....	151
6.35	Sanierung der Hohlkästen einer Talbrücke .....	151
6.36	Externe Kosten von Instandhaltungsstrategien .....	152
6.37	Ergebnisunsicherheiten externe Kosten Brücken B und C .....	153
6.38	Lebenszykluskosten Brücke B, Konstruktionsvarianten .....	155
6.39	Lebenszykluskosten Brücke C, Konstruktionsvarianten .....	155
6.40	Lebenszykluskosten Brücken B und C, Instandhaltungsstrategien .....	156
7.1	Vergleich Lebenszykluskosten und externe Kosten .....	160
7.2	Vergleich Bauwerksökobilanz und externe Umwelteffekte .....	161
7.3	Präferenzkurven zur Differenzwertbewertung in PROMETHEE .....	167
7.4	Systemvarianten von Infrastruktur-Nachhaltigkeitsbewertungssystemen .....	169
7.5	Systemvariantenvergleich mit PROMETHEE .....	171
7.6	Autobahntypenvergleich mit PROMETHEE .....	172
C.1	Erhaltungszeiträume und Kosten Fahrbahnübergänge Zweifeldbrücke .....	192
C.2	Erhaltungszeiträume Lager Zweifeldbrücken .....	193
C.3	Erhaltungszeiträume Kappen Zweifeldbrücken .....	194
C.4	Erhaltungszeiträume Brüstungen Zweifeldbrücken .....	195
C.5	Erhaltungszeiträume Asphaltübergänge und Asphalt Zweifeldbrücke .....	196
C.6	Erhaltungszeiträume Fahrbahnübergänge Mehrfeld-Hohlkastenbrücken .....	198
C.7	Erhaltungszeiträume Fahrbahn Mehrfeld-Hohlkastenbrücken .....	199
C.8	Erhaltungszeiträume Fahrbahnübergänge Mehrfeldbrücken .....	200

C.9	Erhaltungszeiträume Kappen Mehrfeldbrücken.....	201
C.10	Erhaltungszeiträume Abdichtungen Mehrfeldbrücken.....	202
C.11	Erhaltungszeiträume Brüstungen Mehrfeldbrücken.....	203
C.12	Erhaltungszeiträume Verformungslager.....	204
C.13	Erhaltungszeiträume Stahllamellen-Fahrbahnübergänge.....	205
C.14	Kosten Stahllamellen-Fahrbahnübergänge.....	205
C.15	Erhaltungszeiträume Entwässerungen und Schutzeinrichtungen.....	206
E.1	Längsneigungs- und schwerverkersanteilabhängiger Reduktionsfaktor.....	236
E.2	Typisierte Wochen- und Tagesganglinien für PKW.....	238
E.3	Berechnungsansätze für unterschiedlichen Baustellenbereiche.....	243
E.4	Abbildung von Verdrängungseffekten im Staubereich.....	248
E.5	Kraftstoffverbräuche in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeiten.....	253
E.6	Jahresabhängige PKW-Fahrzeugflotte in Euroklassen.....	254
E.7	Angewendete geschwindigkeitsabhängige Kraftstoffverbrauchsfunktionen.....	255

## Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften von Infrastrukturbauwerken.....	24
2.2	Kommerzielle Bewertungssysteme für Infrastrukturen .....	26
2.3	Abgrenzung Nachhaltigkeitsbewertung und Lebensdauermanagement .....	38
3.1	Vergleich externe Kostenrechnung und Ökobilanzierung .....	53
3.2	Monetarisierungsansätze für Zeitkosten .....	57
3.3	Monetarisierung Zeitkosten, Parameter Dichtefunktionen.....	58
3.4	Monetarisierungsansätze für Betriebskosten .....	59
3.5	Monetarisierung Betriebskosten, Parameter Dichtefunktionen.....	59
3.6	Monetarisierungsansätze für Klima- und Luftschadstoffe .....	60
3.7	Monetarisierung Klima-/Luftschadstoffe, Parameter Dichtefunktionen .....	61
4.1	Referenz-Nutzungsdauern Über-/Unterbau sowie Überbaukomponenten .....	71
4.2	Referenz-Nutzungsdauern von Instandsetzungen und Fahrbahnbelägen.....	72
4.3	Datensätze aus der Datenbank SIB-Bauwerke .....	73
4.4	Bauzeiten und Verkehrsführungen Herstellung Integralbrücke .....	83
4.5	Bauzeiten und Verkehrsführungen Lebenszyklus Integralbrücke .....	85
5.1	Verkehrsparameter der Referenzautobahnen .....	93
5.2	Typisierte Ganglinien der Referenzautobahnen .....	93
5.3	Berechnungsgrundlage für Lebenszykluskosten und Ökobilanzierung.....	102
5.4	Unsicherheiten und verwendete Modellierungsansätze .....	111
6.1	Erhöhungsfaktoren zur Abschätzung von Bauprozessauswirkungen .....	140
7.1	Eingangswerte PROMETHEE-Bewertung .....	170
B.1	Einordnung marktorientierter Infrastrukturbewertungsansätze .....	186
B.2	Einordnung forschungsorientierter Infrastrukturbewertungsansätze.....	187
B.3	Einordnung indikatorenbasierter Infrastrukturbewertungsansätze .....	188
B.4	Einordnung normativer und richtlinienorientierter Infrastrukturbewertungsansätze .....	189

D.1	Bauzeiten Herstellungsphase Referenzbrücke A1 .....	208
D.2	Bauzeiten Herstellungsphase Referenzbrücke A2-V .....	208
D.3	Bauzeiten Herstellungsphase Referenzbrücke A2-B .....	209
D.4	Bauzeitenübersicht Nutzungsphase A-Referenzbrücken .....	210
D.5	Bauzeiten Lebenszyklus A1, Präventivstrategie .....	212
D.6	Bauzeiten Lebenszyklus A1, Zustandsbestimmte Strategie .....	213
D.7	Bauzeiten Lebenszyklus A1, Strategie der gezielten Alterung .....	213
D.8	Bauzeiten Lebenszyklus A2-V, Präventivstrategie .....	214
D.9	Bauzeiten Lebenszyklus A2-V, Zustandsbestimmte Strategie .....	215
D.10	Bauzeiten Lebenszyklus A2-V, Strategie der gezielten Alterung .....	216
D.11	Bauzeiten Lebenszyklus A2-V, WT-Stahl, Zustandsbestimmte Strategie .....	217
D.12	Bauzeiten Lebenszyklus A2-B, Zustandsbestimmte Strategie .....	218
D.13	Bauzeiten Herstellungsphase Referenzbrücke B .....	219
D.14	Bauzeitenübersicht Nutzungsphase B-Referenzbrücke .....	220
D.15	Bauzeiten Lebenszyklus B, Präventivstrategie .....	222
D.16	Bauzeiten Lebenszyklus B, Strategie der gezielten Alterung .....	223
D.17	Bauzeiten Lebenszyklus B, Zustandsbestimmte Strategie .....	224
D.18	Bauzeiten Lebenszyklus B-I, Zustandsbestimmte Strategie .....	225
D.19	Bauzeiten Herstellungsphase Referenzbrücke C .....	226
D.20	Bauzeitenübersicht Nutzungsphase C-Referenzbrücke .....	227
D.21	Bauzeiten Lebenszyklus C, Präventivstrategie .....	229
D.22	Bauzeiten Lebenszyklus C, Strategie der gezielten Alterung .....	230
D.23	Bauzeiten Lebenszyklus C, Zustandsbestimmte Strategie .....	231
D.24	Bauzeiten Lebenszyklus C, WT-Stahl, Zustandsbestimmte Strategie .....	232
E.1	Reduktionsfaktoren zur Kapazitätsberechnung von Baustellenengpässen .....	234
E.2	Baustellen-Grundkapazitäten von 2-spurigen Autobahnen .....	235
E.3	Baustellen-Grundkapazitäten von 3-spurigen Autobahnen .....	235
E.4	Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung der Jahresganglinienart .....	237
E.5	Typisierte Tagesganglinien Montag .....	240
E.6	Typisierte Tagesganglinien Dienstag bis Donnerstag .....	240
E.7	Typisierte Tagesganglinien Freitag .....	241
E.8	Typisierte Tagesganglinien Samstag .....	241
E.9	Typisierte Tagesganglinien Sonntag .....	242
E.10	Parameter für Abfragen aus dem Handbuch Emissionsfaktoren .....	254
E.11	Berücksichtigte Unsicherheiten bei Kapazitätsreduzierungen .....	259
E.12	Berücksichtigte Unsicherheiten bei Umleitungen .....	262



F.1	Ökobilanz externe Umwelteffekte: Pendlerautobahn Brücke A1.....	264
F.2	Ökobilanz externe Umwelteffekte: Grundlastautobahn Brücke A1 .....	264
F.3	Ökobilanz externe Umwelteffekte: Landautobahn Brücke A1.....	265
F.4	Ökobilanz externe Umwelteffekte: Wochenendautobahn Brücke A1 .....	265
F.5	Ökobilanz externe Umwelteffekte: Grundlastautobahn Brücke A2-V.....	266
F.6	Ökobilanz externe Umwelteffekte: Grundlastautobahn Brücke A2-B.....	266
F.7	Bauwerks-Ökobilanz Brücke A1.....	267
F.8	Bauwerks-Ökobilanz Brücke A2-V .....	267
F.9	Bauwerks-Ökobilanz Brücke A2-B .....	268
G.1	Infrastrukturbezogene Indikatoren Ökonomie und Ökologie (1) .....	270
G.2	Infrastrukturbezogene Indikatoren Ökologie (2) .....	271
G.3	Infrastrukturbezogene Indikatoren Soziales .....	272
G.4	Infrastrukturbezogene Indikatoren Technik, Funktion .....	273
G.5	Infrastrukturbezogene Indikatoren Prozess.....	274



# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

## Abkürzungen

Üko .....	Fahrbahnübergangskonstruktion
AHP .....	Analytic Hierarchy Process
AP .....	Acidification Potential, Versauerungspotential
BASSt .....	Bundesanstalt für Straßenwesen
bau .....	business as usual (Szenario eines unveränderten Verhaltens)
BMS .....	Bauwerks-Management-System
BMVBS .....	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BNB .....	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesbauten (Deutschland)
BREEAM .....	Building Research Establishment Environmental Assessment Method (England)
BVWP .....	Bundesverkehrswegeplan
CEN .....	Comité Européen de Normalisation – European Committee for Standardization
CML .....	Centrum voor Milieukund – Institute of Environmental Sciences der Universität Leiden, gleichzeitig Charakterisierungsmethode im Rahmen der Wirkungsabschätzung innerhalb einer Ökobilanzierung
DFG .....	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DGNB .....	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V.
DIN .....	Deutsches Institut für Normung
DPSIR .....	Drivers, Pressures, State, Impact und Responses Indikatorenmodell
DTV .....	durchschnittlicher täglicher Verkehr
EoL .....	End-of-Life, Phase am Lebenszyklusende in der Ökobilanzierung
EP .....	Eutrophication Potential, Überdüngungspotential
EPD .....	Environmental Product Declarations – Umweltproduktdeklarationen

EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
FIDIC	Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils
Fogib	DFG-Forschergruppe Ingenieurbauwerke
GEV	Generalized Extreme Value (Verteilungsfunktion)
GWP	Global Warming Potential, Treibhauspotential
HBEFA	Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs
HVA B-StB	Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau
HVPI	Harmonisierter Verbraucherpreisindex
IS Tool	Infrastructure Sustainability Rating Tool (Australien)
ISO	International Organization for Standardization
JGL	Jahresganglinie
LCA	Life-Cycle-Assessment, Ökobilanzierung
LCC	Life-Cycle-Costing, Lebenszykluskostenrechnung
LZ	Lebenszyklus
MADM	Multi Attribute Decision Methods
MCDM	Multi Criteria Decision Making – Multikriterielle Entscheidungsunterstützung
NaBrü	Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken (Akronym für das Forschungsprojekt „Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit“)
NISTRA	Nachhaltigkeitsindikatoren für Straßeninfrastrukturprojekte (Schweiz)
NMHC	Non Methane Hydrocarbons, Nicht Methan Kohlenwasserstoffe
NMVOC	Non Methane Volatile Organic Compounds, flüchtige organische Nicht Methan Verbindungen
ODP	Ozone Depletion Potential, Ozonschichtabbaupotential
PE	Gesamtprimärenergiebedarf
PEne	Primärenergiebedarf nicht erneuerbar
PMS	Pavement-Management-System
POCP	Photochemical Ozone Creation Potential, Ozonbildungspotential

PROMETHEE	Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation
RI-WI-BRÜ . . . .	Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken
RWS . . . . .	Richtlinie für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen
SC . . . . .	Sub Committee (von Normungsgremien)
SPeAR . . . . .	Sustainable Project Appraisal Routine (Firma Arup)
SV . . . . .	Schwerverkehr
SVA . . . . .	Schwerverkehrsanteil
TC . . . . .	Technical Committee (von Normungsgremien)
TGL . . . . .	Tagesganglinie
UBA . . . . .	Umweltbundesamt
VF . . . . .	Verkehrsführung
WG . . . . .	Working Group (von Normungsgremien)
WGL . . . . .	Wochenganglinie
WLC . . . . .	Whole-Life-Costs

### Symbole

$\Delta E_{An+B+Be}$ . . . .	zusätzliche Emissionen im staufreien Fall
$\Delta E_{S+B+Be}$ . . . . .	zusätzliche Emissionen im Staufall
$\Delta K_{An+B+Be}$ . . . .	zusätzlicher Gesamtkraftstoffverbrauch im staufreien Fall
$\Delta K_{S+B+Be}$ . . . . .	zusätzlicher Gesamtkraftstoffverbrauch im Staufall
$\Delta T_{An+B}$ . . . . .	Zeitverlust Annäherungs- und Baustrecke im staufreien Fall
$\Delta T_{BZ}$ . . . . .	Zeitverluste in der gesamten Bauzeit
$\Delta T_{S+B}$ . . . . .	Zeitverlust Stau- und Baustrecke im Staufall
$\bar{L}_{S,korr}$ . . . . .	zusätzliche mittlere Rückstaulänge durch Verdrängung
$\bar{L}_S$ . . . . .	mittlere Rückstaulänge
$\bar{M}_{S,korr}$ . . . . .	zusätzliche mittlere Anzahl Fahrzeuge im Stau durch Verdrängung
$\bar{M}_S$ . . . . .	mittlere Warteschlange der Kraftfahrzeuge innerhalb einer Stunde
$\bar{t}_{W,korr}$ . . . . .	zusätzliche mittlere Wartezeit der verdrängten Fahrzeuge

$\bar{t}_W$ .....	mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug in der Staustunde
$\bar{v}_{Um}$ .....	mittlere Geschwindigkeit auf der Umleitungsstrecke
$\phi(a_i)$ .....	Gesamtfluss bzw. Nettofluss, der eine Rangfolge der Ergebnisse erzeugt
$\phi^+(a_i)$ .....	Ausgangsfluss der angibt, wie stark die Alternative $a_i$ andere Alternativen dominiert
$\phi^-(a_i)$ .....	Eingangsfluss der angibt, wie stark die Alternative $a_i$ von anderen Alternativen dominiert wird
$\pi(a_i, a_j)$ .....	Outranking-Relation jeder Alternative $a_i$ gegenüber der Alternative $a_j$
$c_{E,WK}$ .....	Charakterisierungsfaktor der jeweiligen Emission zur Bestimmung des Beitrags zu der zu berechnenden Wirkungskategorie
$d_{frei}$ .....	Verkehrsdichte bei staufreier Fahrt
$d_S$ .....	Verkehrsdichte im Stau
$DTSV$ .....	durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr
$DTV$ .....	durchschnittlicher täglicher Verkehr (PKW und Schwerverkehr)
$DWV_{RB}$ .....	durchschnittlicher wöchentlicher Verkehr der Repräsentativbauwoche
$e_{RB}$ .....	Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung der Jahresganglinienart bei der Berechnung des DTV der Repräsentativwoche
$E_{Um}$ .....	Emissionen bzw. Kraftstoffverbräuche beim Durchfahren der Umleitungsstrecke
$e_v$ .....	bezogene Emissionen bzw. Kraftstoffverbräuche bei der jeweiligen Geschwindigkeit $v$ auf der Umleitungsstrecke
$EK_{B1}$ .....	externe Kosten verursacht durch Kapazitätsreduzierung
$EK_{B2}$ .....	externe Kosten verursacht durch verlängerte Fahrwege
$EK_B$ .....	externe Kosten im Baustellenbetrieb
$EK_{LZ}$ .....	externe Kosten im gesamten Lebenszyklus
$EK_N$ .....	externe Kosten im Normalbetrieb
$f_{SV,Steig}$ .....	Funktion zur Reduktion der Grenzkapazität zur Berücksichtigung von Längsneigung, Baustellenlänge und Schwerverkehrsanteil
$GK_E$ .....	externe Grenzkosten
$GK_P$ .....	private Grenzkosten
$GK_S$ .....	soziale Grenzkosten
$GK_{E,B}$ .....	externe Grenzkosten im Baustellenbetrieb

$GK_{P,B}$ .....	private Grenzkosten im Baustellenbetrieb
$GK_{S,B}$ .....	soziale Grenzkosten im Baustellenbetrieb
$K_P$ .....	private Kosten
$K_S$ .....	soziale Kosten
$k_v$ .....	bezogener Kraftstoffverbrauch bei der zugehörigen Geschwindigkeit $v$
$K_{He}$ .....	Herstellungskosten
$K_{IS,BG}$ .....	Instandhaltungskosten der Bauteilgruppen
$K_I$ .....	Inspektionskosten
$K_{P,N}$ .....	private Kosten im Normalbetrieb
$K_R$ .....	Rückbaukosten
$K_{S,B}$ .....	soziale Kosten im Baustellenbetrieb
$K_{S,N}$ .....	soziale Kosten im Normalbetrieb
$K_{VF}$ .....	Kosten für die Einrichtung, Vorhaltung, ggf. Umbau und Rückbau der Verkehrsführung
$L_{An}$ .....	Länge des Annäherungsbereichs
$L_{Be}$ .....	Länge des Beschleunigungsbereichs
$L_B$ .....	Länge der Baustelle
$L_{Um}$ .....	Länge der Umleitung
$LZK$ .....	Barwert der Lebenszykluskosten einer Brücke
$m_B$ .....	Monetarisierungsansatz kilometerbezogene Betriebskosten
$m_K$ .....	Kraftstoffkosten pro Bezugseinheit
$M_{S,A}$ .....	Anzahl der im Stau stehenden Fahrzeuge am Stundenanfang
$m_S$ .....	Monetarisierungsansatz der einzelnen Schadstoffe $S$
$m_T$ .....	Monetarisierungsansatz Zeitverluste
$MK$ .....	gefahrene Mehrkilometer bei Umleitungen
$p_k$ .....	Präferenzwert bei Bewertung der Differenz zweier Alternativen $a_i, a_j$
$Q$ .....	Verkehrsnachfrage
$Q_{grenz}$ .....	stündlich maximal bedienbare Verkehrsnachfrage (Grenzkapazität)
$Q_{vor}$ .....	vorhandene, stündliche Verkehrsnachfrage
$r_{Um}$ .....	Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von Verkehrsumlagerungen
$T_{Um}$ .....	zusätzliche Zeit zum Durchfahren der Umleitungsstrecke

$v_{frei}$ .....	Geschwindigkeit ohne Geschwindigkeitsbeschränkung
$v_{zul}$ .....	zulässige Geschwindigkeit (Geschwindigkeitsbeschränkung)
$w_k$ .....	Wichtungsfaktor für das Kriterium $k$
$WA_{WK}$ .....	Wirkungsabschätzung in der jeweiligen Wirkungskategorie
$T_W$ .....	Gesamtwartezeit aller Kraftfahrzeuge in der Staustunde



# 1 Einleitung

Brücken verbinden. Sie sind Bestandteil des Verkehrsnetzes und entfalten erst im Zusammenspiel mit den angrenzenden Verkehrswegen ihre Sinnhaftigkeit. Brücken tragen zum Funktionieren des täglichen Lebens bei, ermöglichen das Überwinden von Hindernissen und sind Grundvoraussetzung für Mobilität.

Die wichtige Bedeutung dieser Infrastrukturkomponenten spiegelt sich allerdings nur bedingt in dem heutigen Umgang mit ihnen wider. Oftmals wird der günstigste bzw. billigste Anbieter mit dem Bau einer Brücke beauftragt und durch verzögerte Instandhaltungsmaßnahmen verschlechtert sich der Zustand des deutschen Brückenportfolios zunehmend. Diese Art zu denken und zu handeln greift allerdings zu kurz, da durch die starke Interaktion von Brückenbauwerken und den Verkehrsteilnehmern bei ungenügender Planung große negative volkswirtschaftliche Auswirkungen entstehen können.

Diese Arbeit legt den Untersuchungsschwerpunkt auf genau diese Wechselwirkungen zwischen Baumaßnahmen an Straßenbrücken und den damit verbundenen Auswirkungen auf die Verkehrsteilnehmer und die Gesellschaft. Im Folgenden wird zunächst die zu untersuchende Aufgabenstellung spezifiziert, danach erfolgt die Formulierung der Zielsetzung und abschließend wird der Aufbau der Arbeit vorgestellt.

## 1.1 Motivation und Aufgabenstellung

In Deutschland und weltweit hat in den letzten Jahrzehnten die Ausrichtung des Handelns an dem Leitbild der Nachhaltigkeit stark an Bedeutung gewonnen. Auf das Bauwesen übertragen führt der Nachhaltigkeitsgedanke zu einer Einbeziehung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Aspekten in die Entscheidungsfindung. Des Weiteren werden alle Auswirkungen entstehend im gesamten Lebenszyklus berücksichtigt. Daraus resultieren Systemgrenzen, die gegenüber bisherigen Entscheidungsgrundlagen (i. d. R. Berücksichtigung der Herstellungskosten eines Bauwerks) deutlich weiter ausgelegt sind.

Im Bauwesen sind die ersten Nachhaltigkeitsuntersuchungen für Hochbauten durchgeführt worden. Einen ersten Anhaltspunkt über die zeitliche Entwicklung des Themenfel-

des Nachhaltigkeit liefert Abbildung 1.1. Die dort dargestellte Anzahl von wissenschaftlichen Veröffentlichungen bei Verwendung verschiedener Suchbegriffe zeigt, dass ab dem Jahr 2000 eine Zunahme an Beiträgen zu Nachhaltigkeitsthemen zu verzeichnen ist. Nachhaltigkeitsanalysen von Gebäuden rücken ab dem Jahr 2005 stärker in den Fokus und erst ab 2010 nimmt die Bedeutung von Infrastrukturbauwerken deutlich zu.

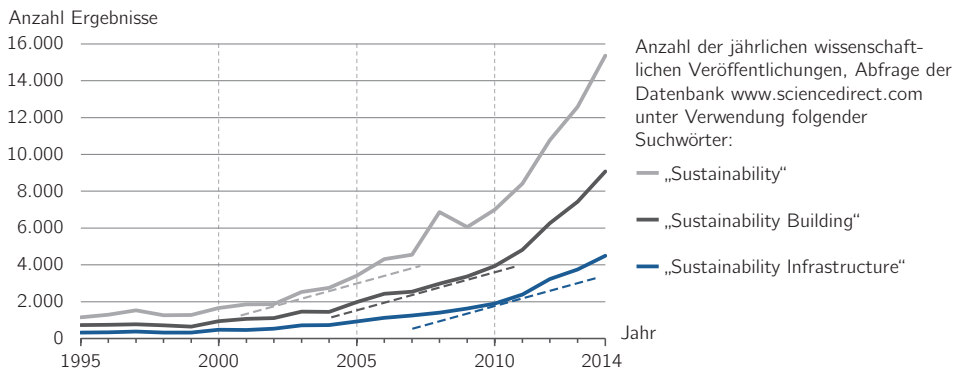


Abbildung 1.1: Jährliche Anzahl wissenschaftlicher Artikel zu verschiedenen Nachhaltigkeitsbegriffen

Natürlich ist diese Datenbankabfrage keine fundierte wissenschaftliche Analyse, sie vermittelt allerdings einen guten Eindruck über die zeitliche Entwicklung von verschiedenen Forschungsströmungen. Es zeigt sich, dass die Untersuchung von Fragestellungen zur Nachhaltigkeit von Infrastrukturen erst in den letzten Jahren Fahrt aufnimmt. Dieses Erkenntnis wird durch Aktivitäten in anderen Bereichen bestätigt, wie beispielsweise der Entwicklung von infrastrukturbezogenen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen oder Normungsaktivitäten.

Ein Grund für die vergleichsweise späte Fokussierung auf Infrastrukturen liegt in dem komplexen Bewertungsgegenstand. Am Beispiel von Brücken lässt sich veranschaulichen, dass nicht nur das Bauwerk selbst, sondern auch die Wirkungen auf die angrenzenden Verkehrswege in die Analysen integriert werden müssen, um eine ganzheitliche Bewertung zu gewährleisten. Muss beispielsweise eine Fahrspur aufgrund von Instandhaltungsmaßnahmen gesperrt werden, kann es durch die Kapazitätsreduzierung zu Verkehrsstaus kommen. Als Folge entstehen Zeitverluste bei den Straßennutzern, die Schadstoffemissionen nehmen bei Stop-and-go-Fahrweise zu und es kommt zu einer Veränderung der Unfallhäufigkeit. Gleichzeitig führen erforderliche Brückensperrungen zu Umleitungen und damit zu Mehrkilometern, außerdem können Brücken die Schallemissionen entstehend durch Verkehr erhöhen. Alle diese möglichen Effekte sind in Abbildung 1.2 visualisiert.

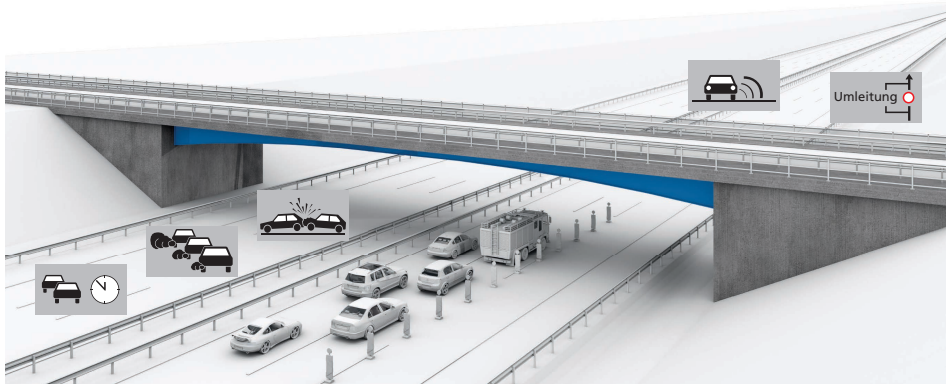


Abbildung 1.2: Mögliche Auswirkungen von Brückenbaumaßnahmen und den damit verbundenen Verkehrsführungen über- und unterhalb einer Brücke

Erst bei Integration dieser Aspekte in die Entscheidungsfindung kann von einem Handeln gesprochen werden, das sich an dem Leitbild der Nachhaltigkeit orientiert. Allerdings ist die Art der Integration einzelner Berechnungsaspekte und -methoden Gegenstand laufender Diskussionen. Aus dieser Ausgangssituation leitet sich die im Folgenden vorgestellte Zielsetzung ab.

## 1.2 Zielsetzung

Die vorliegende Arbeit ordnet sich in die Nachhaltigkeitsforschung ein, deren grundsätzliche Natur sich durch eine Inter- und Transdisziplinarität auszeichnet (BOGNER 2010). Mit dem Begriff Interdisziplinarität kann sowohl die direkte Kooperation zwischen verschiedenen Fachrichtungen (Ingenieurwesen, Wirtschaftswissenschaften etc.) als auch die Anwendung von disziplinübergreifenden Methoden durch eine Fachrichtung beschrieben werden (SCHOPHAUS et al. 2003). Transdisziplinarität ist durch einen starken Bezug zu Praxisproblemen gekennzeichnet, sowohl bei der Definition der Forschungsaufgabe als auch bei der Formulierung der Ergebnisse (BERGMANN et al. 2005).

Auf Grundlage der vorgestellten Definitionen ist der in dieser Arbeit verwendete Untersuchungsansatz als interdisziplinär einzuordnen. Anwendung finden dabei Methoden und Lösungsstrategien aus den Ingenieur-, Verkehrs-, Wirtschafts-, Volkswirtschafts- und Umweltwissenschaften. Zusätzlich beinhaltet die Arbeit durch die Generierung von praxisrelevanten Vergleichswerten und der Ableitung von Empfehlungen für eine praktische

Umsetzung eine transdisziplinäre Komponente. Die im Folgenden konkretisierten Ziele leiten sich direkt aus dem starken interdisziplinären Charakter der Arbeit ab.

Für den Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturen bestehen derzeit noch konzeptionelle Lücken und für Brücken fehlen methodisch konsistente Bewertungsgrundlagen. Des Weiteren existieren für Brücken nur erste Vergleichsrechnungen für Lebenszykluskosten und ökobilanzielle Auswirkungen, externe Effekte entstehend durch die Einrichtung von Baustellen sind bisher für den gesamten Lebenszyklus nur vereinzelt untersucht worden. Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur Lösung aller drei Punkte. Im Einzelnen stehen folgende Ziele im Mittelpunkt:

1. Erarbeitung eines Untersuchungsrahmens für brückenbezogene Nachhaltigkeitsanalysen für die Phase der Entwurfs- und Genehmigungsplanung.
2. Definition von auf Deutschland regionalisierten Eingangsdaten, die eine modellgestützte Berechnung von Auswirkungen über den gesamten Brückenlebenszyklus ermöglichen. Hierzu werden insbesondere Referenzbrücken, Instandhaltungsstrategien, Verkehrssituationen und Kostenansätze hergeleitet.
3. Quantifizierung von Wechselwirkungen zwischen Brückenbaumaßnahmen und der Höhe der Beeinflussung des Verkehrs und der Gesellschaft auf unterschiedlichen Aggregationsebenen. Die Ergebnisse können von Ingenieuren und öffentlichen Auftraggebern als Vergleichswerte verwendet werden.
4. Berechnung von Ergebnisunsicherheiten, da diese einen wichtigen Baustein für die Entscheidungsunterstützung darstellen.
5. Zusammenführung der berechneten Ergebnisse und Entwicklung von Empfehlungen für die Gestaltung von Infrastruktur-Nachhaltigkeitsbewertungssystemen.

Vor allem an dem dritten Ziel ist zu erkennen, dass sich der Untersuchungsgegenstand durch eine Multiskaligkeit auszeichnet. Die zu verwendenden Berechnungsmodelle erlauben eine Auswertung auf verschiedenen Analyseebenen und damit eine detaillierte Deutung der ergebnisbeeinflussenden Komponenten.

### **1.3 Aufbau**

Eine Herausforderung beim Umgang mit Nachhaltigkeitsfragestellungen ist die Vielfalt der einsetzbaren Analysemethoden und Ergebniskategorien. Daher dient das Kapitel 2 als

Einführung in die Thematik und umreißt eine Vielzahl der benötigten Begriffe und Rahmenbedingungen. Kapitel 3 führt in das Konzept der externen Effekte ein, das zur Quantifizierung von Verkehrsauswirkungen in dieser Arbeit verwendet wird. Außerdem werden die zur Überführung der Effekte in Geldeinheiten verwendeten Monetarisierungsansätze vorgestellt und diskutiert.

Alle Informationen, die zur Beschreibung des Lebenszyklus von Brücken auf Bauteilebenen erforderlich sind, werden in Kapitel 4 hergeleitet. Darunter fallen Erneuerungszyklen, die Definition von Instandhaltungsstrategien und die Herleitung von Bauzeitansätzen. Als Basis für die Festlegung der Erneuerungszyklen der Brückenbauteile dient eine Realdatenanalyse der deutschen Brückendatenbank SIB-Bauwerke. Die im Rahmen der Modellierung vornehmlich zur Anwendung kommenden Methoden der Lebenszykluskostenrechnung, externen Kostenrechnung und Ökobilanzierung werden genauso wie die verwendeten Systemgrenzen und angewendeten Verfahren zur Quantifizierung von Unsicherheiten in Kapitel 5 erläutert.

Die für verschiedene Referenzbrücken, Autobahntypen, Instandhaltungsstrategien und Konstruktionsvarianten durchgeführten Auswertungen sind Bestandteil von Kapitel 6. Hier findet eine umfassende Ergebnisdarstellung auf verschiedenen Skalen sowie die Diskussion der Ergebnisursachen statt. Die Zusammenführung der Ergebnisse ist Bestandteil von Kapitel 7. Verschiedene Möglichkeiten der Gegenüberstellung von externen Effekten mit bauwerksbezogenen Kosten und ökobilanziellen Ergebnissen werden diskutiert und Empfehlungen für die Gestaltung von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen von Infrastrukturen abgeleitet. Eine Zuordnung der Kapitel zu den Untersuchungsschwerpunkten findet sich in Abbildung 1.3.

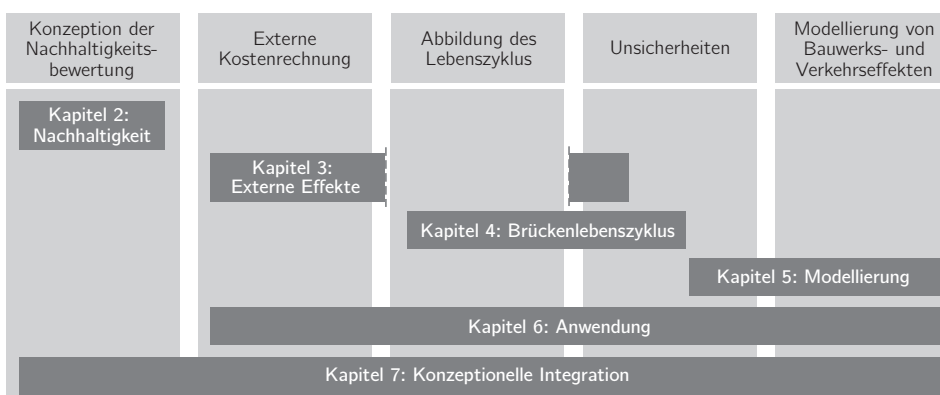


Abbildung 1.3: Zuordnung der Kapitel zu den Untersuchungsschwerpunkten



## 2 Nachhaltigkeit

International haben sich seit etwa zwanzig Jahren die Begriffe „Nachhaltigkeit“ und „nachhaltige Entwicklung“ in der Sprache manifestiert. Allerdings sind sie nicht eindeutig definiert, sondern können eine Reihe von unterschiedlichen Bedeutungen aufweisen. Je nach Anwendungsgebiet und Zielsetzung der Aussage wird der Begriff „nachhaltig“ von verschiedenen Akteuren teilweise als Synonym für langfristig, zukunftsfähig, zukunftsverträglich, dauerhaft, generationsübergreifend, ganzheitlich, umweltverträglich oder ökologisch verwendet (PEARCE et al. 1989; HABER 1995).

Eine inhaltliche Auseinandersetzung mit der Historie sowie der im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse zur Anwendung kommenden Instrumente und Methoden ist daher als Ausgangspunkt für eine Entwicklung von Bewertungsansätzen für Infrastrukturbauwerke erforderlich. Da allerdings Nachhaltigkeitsforschung heutzutage auch als Trend charakterisiert werden kann, wird die Vielzahl der Ergebnisse, Ansätze und Veröffentlichungen zunehmend unübersichtlicher. Hinzu kommt ein inter- und transdisziplinärer Charakter, der die Verständigung und Diskussion von verschiedenen Forschungsfeldern und Akteuren erforderlich macht. Daher wird im Folgenden eine begriffliche und inhaltliche Einführung in die jüngere Entwicklung des Themengebietes Nachhaltigkeit – unterteilt in die Bereiche übergeordnete Entwicklung, Bauwesen und Infrastruktur – vorgenommen, um eine Basis für die Analysen in den nachfolgenden Kapiteln zu legen. Ein Schwerpunkt wird dabei auf Deutschland gelegt, eine stärker auf die internationale Entwicklung ausgerichtete Übersicht ist in BOCCHINI et al. (2014) erschienen.

### 2.1 Nationale und internationale Nachhaltigkeitsentwicklung

#### 2.1.1 Historischer Abriss

Die heutzutage im Zusammenhang mit dem Begriff „Nachhaltigkeit“ diskutierten Inhalte zeigen eine starke Verwurzelung in ökologischen Fragestellungen. Besonders das zunehmende ökologische Bewusstsein in den 1970er und 1980er Jahren und das Engagement

von nicht staatlichen Organisationen und Gruppierungen führt zu verschiedenen umweltpolitischen Initiativen der Regierung, woraus eine Reihe umweltpolitischer Instrumente wie die Umweltberichtserstattung entstehen (JAMISON 1996; LITTIG und GRIESSLER 2004). Etwa zeitgleich publiziert der Club of Rome den Bericht „Limits to Growth“, in dem prognostiziert wird, dass die Weltressourcen in 100 Jahren erschöpft seien und zu einem Zusammenbruch der Weltwirtschaft führten (MEADOWS et al. 1972). Ab Mitte der 1980er Jahre werden die sozialen und ökologischen Probleme in einen internationalen Zusammenhang gestellt und das Konfliktpotential zwischen den Industriestaaten und den gleichermaßen betroffenen Entwicklungsländern beschrieben (JAMISON 1996).

An diesem Punkt setzt auch der Brundtland Report „Our Common Future“ an, der 1987 u. a. das Verhältnis zwischen der Entwicklungs- und Umweltpolitik thematisiert (BRUNDTLAND 1987). Hierin wird auch die heute noch verwendete Definition der nachhaltigen Entwicklung erarbeitet: *„Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“* (BRUNDTLAND 1987). Der Brundtland Report stellt den Anstoß für die Einberufung der Konferenz für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen in Rio de Janeiro im Jahr 1992 dar. Wichtigstes Ergebnis ist die Verabschiedung der Agenda 21, ein Aktionsprogramm, das vor allem die Gebiete der Armutsbekämpfung, der Energiepolitik und des Ressourcenschutzes sowie politische Handlungsmöglichkeiten und Instrumente für die Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung abdeckt (UNCED 1993). Die getroffenen Vereinbarungen werden auf dem Johannesburg Gipfel für nachhaltige Entwicklung im Jahr 2002 erweitert und gestärkt (UN 2002).

Die aufgeführten internationalen Entwicklungen ebnen den Weg für eine intensive Diskussion des Themas Nachhaltigkeit in den 1990er Jahren. In diesem Zuge entwickelt sich ein Verständnis von verschiedenen Dimensionen oder Säulen, die als Zielbereiche das allgemeine Leitbild der Nachhaltigkeit konkretisieren. In Deutschland trägt vor allem das Wuppertal Institut zu dieser Diskussion bei. Dieses zeigt in seiner Studie „Zukunftsfähiges Deutschland“ wichtige Zusammenhänge der Nachhaltigkeitsdiskussion auf und führt die Begriffe starke und schwache Nachhaltigkeit ein (LOSKE 1996). Hier werden aber vor allem umweltbezogene Aspekte in den Vordergrund gestellt. Eine deutliche Stärkung erfährt die Idee der Integration von wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Aspekten unter dem Leitbild der Nachhaltigkeit durch ein Diskursprojekt, initiiert von dem Verband der Chemischen Industrie (MEISTER et al. 1997). Die Einteilung in diese drei Dimensionen ist allerdings schon vorher national wie international propagiert worden, um eine eindimensionale Ausrichtung auf Umweltfragen zu verhindern (SRU 1996). Das Drei-Säulen-Modell kann heutzutage als ein international anerkanntes Verständigungsinstru-



ment angesehen werden und wird vielfach auch als Kategorisierungsmatrix von Nachhaltigkeitskriterien verwendet. Teilweise findet auch eine Erweiterung statt, indem – je nach Anwendungsgebiet – eine vierte institutionelle, politische oder kulturelle Dimension hinzugefügt wird (OTTO 2007; VALENTIN und SPANGENBERG 2000).

Im Bereich der konkreten politischen Maßnahmen zur Reduzierung von schädlichen Umweltauswirkungen sind die zwei internationalen Umweltkonferenzen im Jahr 1997 in Kyoto und 2009 in Kopenhagen hervorzuheben, auf denen z. B. Reduktionsziele von CO<sub>2</sub>-Emissionen beschlossen wurden. Im Jahr 2006 fand der von STERN (2006) veröffentlichte Bericht „The Economics of Climate Change“ besondere Beachtung, in dem die Folgen der Klimaveränderung in verschiedenen Szenarien ausführlich mit einem Handeln „business as usual“ (bau) verglichen werden. Die zentrale Aussage des Berichts besteht in der Feststellung, dass der globale Nutzen entschiedener frühzeitiger Maßnahmen zur Reduzierung der Auswirkungen des Klimawandels die Kosten deutlich überwiegt. Er knüpft damit an die Aussagen von MEADOWS et al. (1972) an, dass der anthropogene Einfluss auf die Erde zerstörerische Dimensionen annehme.

### 2.1.2 Entwicklung im Hochbau

Im Baubereich entwickeln sich seit Anfang der 1990er Jahre Bewertungsansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung, die sowohl für Bauprodukte als auch für Bauwerke anwendbar sind. Die ersten bauspezifischen Ansätze entstehen damit zeitgleich zu der aufkommenden internationalen Nachhaltigkeitsdiskussion. Als erstes vollständiges Bewertungssystem für Gebäude wird im Jahr 1990 das englische System „BREEAM“ eingeführt (LEE 2012). Hier kann ein deutlicher Bezug zu verschiedenen Umweltströmungen im 20. Jahrhundert identifiziert werden. Dies äußert sich in einer starken Fokussierung der verwendeten Indikatoren auf Umweltaspekte und die ökologische Schwerpunktsetzung ist auch im Namen verankert (Building Research Establishment Environmental Assessment Method). Eine Gegenüberstellung der Gewichtungen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeitsdimension zwischen dem englischen System BREEAM und dem deutlich später entstandenen deutschen System wird z. B. von DRAEGER (2010) sowie SZITAR und GRECEA (2011) vorgenommen. Ab dem Jahr 1998 entstehen eine Reihe weiterer Bewertungssysteme, wobei bis zum Jahr 2008 insgesamt zehn landesspezifische Systeme die Marktreife erreicht haben (GRAUBNER et al. 2009). Auch danach sind weitere Aktivitäten zur Einführung von eigenen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen in vielen Ländern zu beobachten (BARBOSA et al. 2011; LUPÍŠEK et al. 2011; SZITAR und GRECEA 2011).

Zur Überführung der bestehenden Ansätze in die Normung sind im Jahr 2002 das internationale Arbeitsgremium ISO/TC 59/SC 17 „Nachhaltiges Bauen“ und im Jahr 2005 die europäische CEN/TC 350 „Nachhaltigkeit von Gebäuden“ eingerichtet worden. Ziel ist die Erarbeitung von Normen für Bauprodukte, vorgefertigte Elemente und Bauwerke (MENSINGER et al. 2012). Für Infrastrukturbauwerke beschäftigen sich derzeit nur zwei Arbeitsgruppen detailliert mit der Erstellung von Normungsdokumenten, worauf näher in Abschnitt 2.3.2.3 eingegangen wird. Ein weiterer Schritt zur Stärkung des Marktes für nachhaltiges Bauen wird von der Europäischen Kommission im Dezember 2007 durch das Ausrufen einer Leitmarktinitiative vollzogen. Ziel ist die Förderung von neuen Produkten und Dienstleistungen in sechs festgelegten Leitmärkten, wozu auch der Markt „Sustainable Constructions“ gehört (EUROPEAN COMMISSION 2007). Alle diese Aktivitäten heben die stark gestiegene Bedeutung des nachhaltigen Bauens seit Beginn des neuen Jahrtausends hervor.

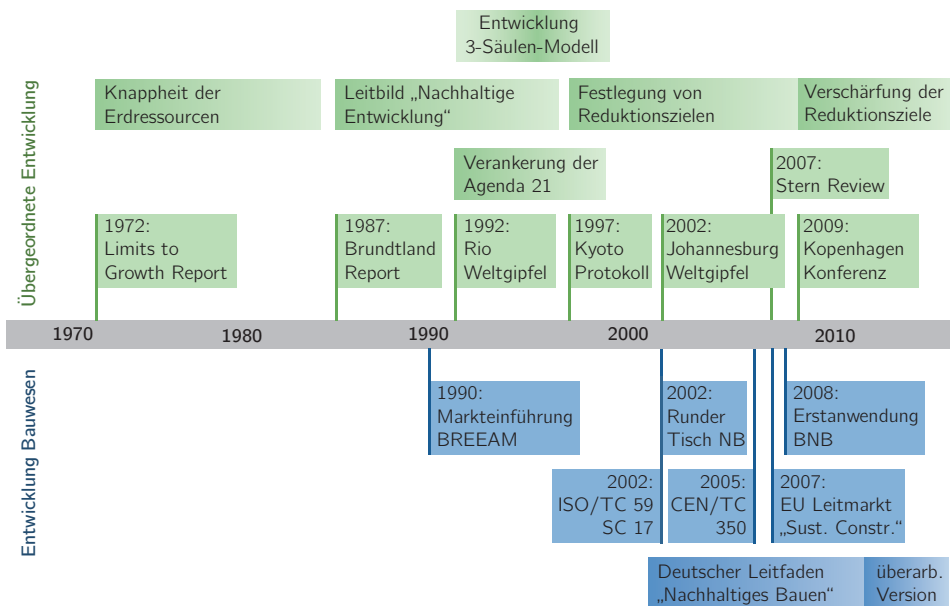


Abbildung 2.1: Meilensteine der Nachhaltigkeitsentwicklung und sowie wichtige Diskussionsthemen in der Politik (oben) und im Bauwesen (unten), in Anlehnung an Bocchini et al. (2014)

In Deutschland werden die ersten Grundlagen für die Nachhaltigkeitsbewertung im Bauwesen im Jahr 2001 gelegt, durch Veröffentlichung des „Leitfadens Nachhaltiges Bauen“, welches ein umfassendes Dokument zur Beschreibung von Nachhaltigkeitsanforderungen

darstellt (BBR 2001). Kurz darauf, im Jahr 2002, findet die erste Sitzung des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen statt, ein das BMVBS unterstützendes Expertengremium. Ab 2005 erfolgt dann die Erstellung einer Reihe von Studien, deren Ergebnisse in das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen von Büroneubauten des Bundes (BNB) einfließen (siehe u. a. GRAUBNER et al. (2007); KÖNIG (2009); BAHR und LENNERTS (2010)). Die Pilotphase mit Festlegung von Referenzwerten wird von der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) und dem BMVBS im Jahr 2008 begonnen und die offizielle Einführung erfolgt Anfang 2010 (BUNDESANZEIGER 2010). Im Jahr 2011 sowie 2013 finden jeweils Aktualisierungen des „Leitfadens Nachhaltiges Bauen“ statt (BMVBS 2013b). Eine zeitliche Übersicht der Meilensteine im Bauwesen sowie der übergeordneten, vornehmlich politischen Aktivitäten ist in Abbildung 2.1 zusammengefasst.

### 2.1.3 Entwicklung im Infrastrukturbereich

Die ersten Aktivitäten für Nachhaltigkeitsanalysen von Infrastrukturbauwerken sind verglichen mit dem Hochbau deutlich später zu verzeichnen. Das erste am Markt einzusetzende Infrastrukturbewertungssystem entsteht im Jahr 2003 in England (CEEQUAL 2010). Genauso wie in den in Nordamerika und England entwickelten Hochbausystemen wird hier der Bewertungsschwerpunkt auf die ökologische Dimension gelegt. Erst ca. zehn Jahre später, im Jahr 2012, kommen zwei weitere praktisch anwendbare Systeme hinzu, das amerikanische System „Envision“ (ENVISION 2012) und das australische System „Infrastructure Sustainability Rating Tool“ (SPRIGG 2012). Alle drei Infrastrukturbewertungssysteme haben gemeinsam, dass sie für eine breite Anwendung geeignet sind und sich nicht auf einen Typ von Infrastrukturbauwerk beschränken. Eine Anwendung ist damit auch für Brückenbauwerke möglich. Darüber hinaus gibt es insbesondere für Straßen eine Vielzahl an Aktivitäten. Bis heute sind für den Typ der Straßeninfrastruktur mindestens acht Systeme entstanden, einige weitere befinden sich derzeit in der Entwicklung. Eine ausführliche Analyse der Systemeigenschaften für die Straßeninfrastrukturbewertung ist in VANZERR et al. (2012) zu finden.

Im Brückenbau sind eine Reihe von deutschen Aktivitäten zu verzeichnen. Eine umfassende Grundlage wird von der „Forschergruppe Ingenieurbauwerke“ (Fogib) finanziert von der DFG in den Jahren 1991-1997 gelegt, deren Forschungsschwerpunkt die ganzheitliche Betrachtung von Ingenieurbauwerken ist und die sich vornehmlich auf Brücken fokussiert (FOGIB 1997). Der Begriff Nachhaltigkeit wird nicht in den Vordergrund gestellt, allerdings werden alle Inhalte, die heute auch in Nachhaltigkeitsbewertungssystemen

men zu finden sind, untersucht. So wird von LÜNSER (1998) im Rahmen von Fogib die erste deutsche Ökobilanz für Brücken erstellt. Weitere Aktivitäten sind deutlich später zu verzeichnen. Hier sind vor allem der Ideenwettbewerb für den „Entwurf einer Straßenbrücke nach ganzheitlichen Wertungskriterien“ (BAYIKA 2011) und das Forschungsprojekt „Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit“ (NaBrü) hervorzuheben (KUHLMANN et al. 2011). Des Weiteren existiert eine deutsche Arbeitsgruppe, die sich mit der Systementwicklung eines deutschen Nachhaltigkeitsbewertungssystems für Infrastruktur beschäftigt (GRAUBNER et al. 2010). Auch weitere brückenbezogene europäische Forschungsprojekte in Europa sind in diese Zeit einzuordnen. Hervorzuheben sind vor allem das finnische Brückenprojekt „Bridge Life Cycle Optimisation“ (ETSI 2009) und das europäische Verbundprojekt „Sustainable Steel-Composite Bridges“ (SBRI 2013), in denen ausführliche ökonomische und ökologische Untersuchungen durchgeführt werden. Die wichtigsten Entwicklungen der Nachhaltigkeitsaktivitäten im Infrastrukturbereich sind in Abbildung 2.2 zusammengefasst.

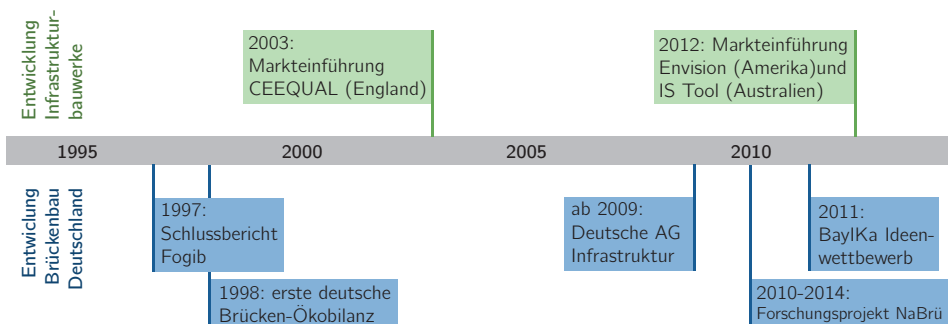


Abbildung 2.2: Meilensteine der Entwicklung des Themas „Nachhaltigkeit von Infrastrukturbauwerken“ (oben) und wichtige Aktivitäten im Bereich des Brückenbaus (unten)

## 2.2 Methodik der Nachhaltigkeitsbewertung

### 2.2.1 Inhalte und Ziele

Die mit dem Leitbild Nachhaltigkeit verbundenen Ziele sind sehr allgemein formuliert und aufgrund ihrer Abstraktheit schwer in das tatsächliche Handeln zu integrieren. Die Verankerung der Agenda 21 (UNCED 1993) fördert als erstes den Ausbau des Leitbilds zu einem technokratischen Konzept, das versucht, Technologien und wissenschaftliche

Erkenntnisse zur Lösung von ökologischen Problemen zu verwenden (OTTO 2007). Damit wissenschaftliche Erkenntnisse für die Nachhaltigkeitsbewertung eingesetzt werden können, müssen konkrete Ziele für das politische Handeln und die Auswahl von Technologien definiert werden.

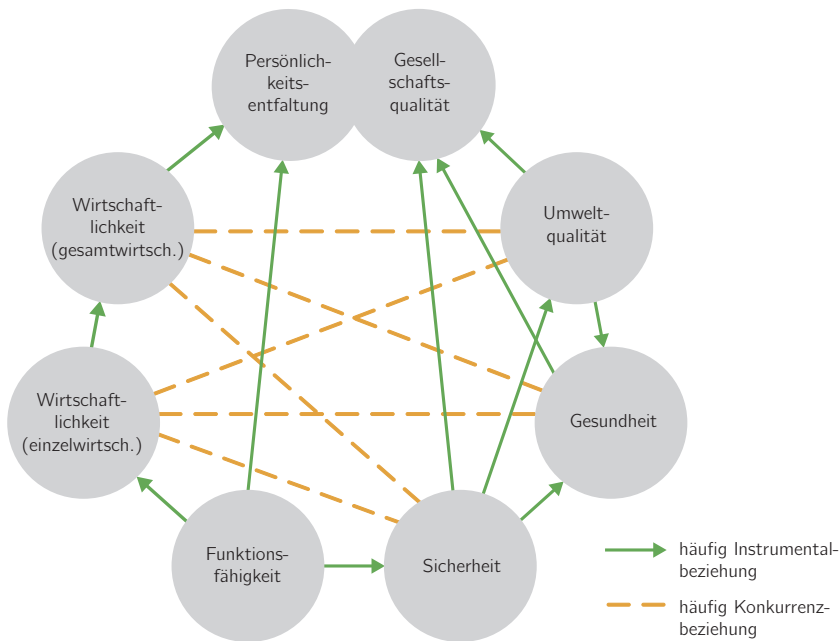


Abbildung 2.3: Werte bzw. Schutzziele für die Technikbewertung und Darstellung von sich ergänzenden Zielen und Zielkonflikten nach VDI 3780 (2000)

Eine Möglichkeit zur Festlegung solcher Ziele wird in der VDI-Richtlinie „Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen“ beschrieben (VDI 3780: 2000). Diese Richtlinie hat die Förderung von verantwortbaren und zukunftsweisenden Techniken zum Ziel und ist für alle Arten von vom Menschen geschaffenen, gegenständlichen Gebilden anwendbar. Es wird ein in Abbildung 2.3 dargestelltes Wertesystem definiert, das als Grundlage für alle Handlungen und Entscheidungen verwendet werden kann. Dabei wird insbesondere auf Produkteigenschaften (Funktionsfähigkeit, Sicherheit), individuelle Werte (Wirtschaftlichkeit, Persönlichkeitsentfaltung) und gesellschaftliche Aspekte (Wohlstand, Umweltqualität) eingegangen und es werden sich ergänzende Ziele und Zielkonflikte visualisiert. Diese Werte zeigen eine große Übereinstimmung mit den im Leitfaden Nachhaltiges Bauen definierten Schutzzielen (BMVBS 2013b). Aufgrund der dort stattfindenden starken

Ausrichtung der Schutzziele auf das Bauwesen ist gegenüber den Aussagen der VDI 3780 (2000) eine Konkretisierung möglich, was in den Schutzzielen „Minimierung der Lebenszykluskosten“ und „Sicherung der gestalterischen und städtebaulichen Qualität“ deutlich wird.

Nachhaltigkeit stellt beim Erreichen der Schutzziele jeweils eine Art Optimalzustand dar. Für den Bereich des Bauens wird dieser Zusammenhang in FIDIC (2004) anschaulich visualisiert, siehe Abbildung 2.4. Der Sprachgebrauch, Nachhaltigkeit als übergeordnetes Ziel zu verstehen, wird außerhalb des Bauwesens z. B. in OTTO (2007) beschrieben. Die nachhaltige Entwicklung ist dabei jeweils der Beitrag, den eine Maßnahme, ein Projekt oder ein Bauwerk zum Leitbild leistet. Abhängig vom Bewertungsergebnis kann von einem höheren oder niedrigeren Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung gesprochen werden. Wie in Abbildung 2.4 im rechten Teil dargestellt, wird die Einteilung auch von kommerziellen Bewertungssystemen aufgegriffen. Abgebildet ist die Bewertungsskala des Systems „SPeAR“, welches von der englischen Firma ARUP (2012) entwickelt wurde und eine zu FIDIC (2004) äquivalente Klasseneinteilung verwendet.

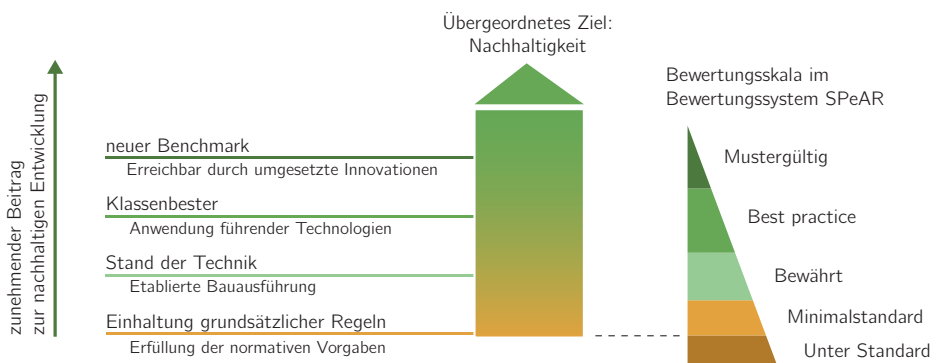


Abbildung 2.4: Zusammenhang zwischen den Begriffen „Nachhaltigkeit“ und „nachhaltige Entwicklung“ sowie Einordnung verschiedener Qualitäten der Bauausführung (FIDIC (2004), links), Bewertungsskala im System SPeAR (Arup (2012), rechts)

Diese Klasseneinteilung stellt eines von mehreren Instrumenten dar, um Einzelaspekte messbar zu machen, die Grundlage für den Vergleich verschiedener Planungsvarianten zu schaffen sowie gegebenenfalls eine Aggregation von verschiedenen Kriterien bzw. Indikatoren zu ermöglichen. In den letzten zwei Jahrzehnten wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden für Nachhaltigkeitsanalysen entwickelt, die teilweise aus anderen Bereichen wie der Umweltbewertung, ökonomischen Gesamtrechnung und den Betriebs-

wirtschaften übernommen und angepasst wurden (SRU 1998). Darüber hinaus ist eine Reihe von neuen Methoden entwickelt worden, insbesondere für die Formulierung von Indikatoren für die schwer erfassbare soziale Dimension. Das übergeordnete Ziel ist, eine Entscheidungsunterstützung bereitzustellen und die Komplexität des Entscheidungsproblems zu reduzieren. Verwendet werden dazu Indikatoren und Indikatorengruppen zur Konkretisierung der oben beschriebenen Schutzziele.

### 2.2.2 Indikatoren, Indikatorensysteme und Indizes

Das Aufgabengebiet der Indikatorenentwicklung stellt ein eigenes Forschungsfeld dar und es gibt mannigfaltige Bemühungen, verschiedene Typen von Indikatoren zu klassifizieren. Ein Indikator ist dabei eine Methode, um eine große Menge an Informationen stark vereinfacht darzustellen, dabei aber die Kernaussage nicht zu verfälschen (OTT 1978). Die Definition des Begriffs „Indikator“ in bauspezifischen Normen gestaltet sich nicht einheitlich, hat aber die Gemeinsamkeit, dass ein Zusammenhang in einer spezifischen, qualitativ oder quantitativ messbaren Größe dargestellt wird, siehe beispielhaft DIN EN ISO 14050 (2010) und ISO 21929-1 (2011). Die Indikatorenentwicklung hat vor allem in dem Bereich der Ökologie eine Vorreiterrolle eingenommen und hier findet sich auch eine weit verbreitete Klassifizierung, das DPSIR-Modell, welches einen Kausalzusammenhang von Handlungen und Auswirkungen auf die Umwelt herstellt (SMEETS und WETERING 1999). Die in dem Modell entworfenen Indikatorklassen sind:

- *Drivers*: Aktivitäten, die zu einer Belastung der Umwelt führen (Verkehr, Baumaßnahmen).
- *Pressures*: Einwirkungen auf die Umwelt (erhöhte Schadstoffkonzentration).
- *State*: Zustand, der durch die Einwirkung induziert wird (Verschmutzung der Luft).
- *Impact*: Auswirkung in spezifischen Kategorien (Treibhauseffekt oder menschliche Gesundheit).
- *Responses*: Maßnahmen, die zu einer Verringerung der Belastung führen und eine Veränderung der Aktivitäten (Drivers) herbeiführen sollen (politische Vermeidungsstrategien durch Gesetze oder Anreizsysteme).

Im Bauwesen lassen sich die überwiegende Anzahl der verwendeten Indikatoren als State- oder Impact-Indikatoren klassifizieren. Dies zeigt auch die in SEDLBAUER et al. (2011)

und WITTSTOCK (2012) entworfene Gliederungssystematik, die speziell auf die Randbedingungen des Bausektors ausgerichtet ist und eine Verfeinerung von State- und Impact-Indikatoren beschreibt. Zu beachten ist, dass dabei auch Indikatoren außerhalb des Anwendungsbereichs der Ökologie miteinbezogen werden. Nach WITTSTOCK (2012) werden vier Indikatorenarten unterschieden und nach der Komplexität des Berechnungsaufwands und Informationsgehalts geordnet:

- *Abstrakte Leistungsindikatoren:* Die darzustellende Größe ist nicht direkt messbar und nur mit Hilfe eines Modells in den Indikator zu überführen. Ein Modell ist dabei die vereinfachte Abbildung eines realen Sachverhalts (BAMBERG et al. 2008). Durch das Modell ist es möglich, unterschiedliche Aspekte zusammenzuführen und auf einem kardinalen Skalenniveau abzubilden. Beispielhaft können die Wirkungskategorien einer Ökobilanz oder die phasenbezogenen Lebenszykluskosten für diesen Indikator typ genannt werden.
- *Konkrete Leistungsindikatoren:* Bei diesem Indikator typ ist häufig eine direkte Messbarkeit gegeben und es kann eine Abbildung der erfassten Sachverhalte auf einer Kardinalskala erfolgen. Die Aspekte werden allerdings einzeln erfasst und eine Zusammenführung unterschiedlicher Aspekte ist nur dann möglich, wenn die Aspekte auf derselben Skala abgebildet werden. Als Beispiel ist der Schallpegel zu nennen, der beim Überfahren einer Übergangskonstruktion mit einer definierten Geschwindigkeit erzeugt wird.
- *Quantitative Zustandsindikatoren:* Diese Art von Indikator ist ordinal bzw. kardinal messbar, allerdings werden nur Zustände abgebildet, die noch keine Aussage über die Qualität des Zustandes erlauben. Es muss sichergestellt werden, dass die Vorgabe eines zu erreichenden Zustandes in einem Nachhaltigkeitsbewertungssystem einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung leistet. Die Anzahl der gesperrten Fahrspuren in der Bauphase ist als quantitativer Zustandsindikator einzuordnen.
- *Binäre Indikatoren:* Der zu erfassende Sachverhalt muss einer vordefinierten Klasse zugeordnet werden (z. B. erfüllt, teilweise erfüllt oder nicht erfüllt). Durch eine je nach erreichter Klasse variierende Punktevergabe wird eine Überführung in eine Ordinalskala ermöglicht. Die Frage nach der Existenz eines Umweltmanagementsystems für ein Bauprojekt ist ein Beispiel für diesen Indikator typ.

Die erstgenannten abstrakten Leistungsindikatoren erzeugen Ergebnisse, welche geeignet sind, Entwurfsvarianten von Bauwerken detailliert abzubilden und verschiedene Aspekte zusammenzuführen. Binäre Indikatoren erfassen demgegenüber eine Ja/Nein-Entscheidung.



dungssituation bzw. eine Stufeneinteilung und lassen daher nur eine grobe Einteilung in Klassen zu. WITTSTOCK (2012) leitet daraus ab, dass vor allem Leistungsindikatoren geeignet sind, um die notwendigen Entscheidungen im Planungsprozess zu unterstützen.

Wenn eine Zusammenstellung von verschiedenen Indikatoren vorgenommen wird, ist das Ergebnis ein Indikatorensystem (im englischen auch als „indicator framework“ bezeichnet, siehe MAYER (2008)). Eine solche Sammlung verschiedener Einzelindikatoren soll dazu dienen, einen Sachverhalt so abzubilden, dass die Messung einzelner Aspekte erfolgen kann und die definierten Schutzziele in ihrer Gesamtheit dargestellt werden (SRU 1998). Neben der Indikatorenauswahl spielt insbesondere die Normierung und Wichtung eine wesentliche Rolle, wenn eine Aggregation der einzelnen Indikatoren erfolgen soll. Dabei kann die Zusammenführung auf unterschiedlichen Ebenen stattfinden, in einzelnen Kategorien oder in einem Gesamtindex (Abbildung 2.5). Eine Zusammenfassung zu einem Index wird oftmals durchgeführt, um die Öffentlichkeit anzusprechen und eine plakative Darstellung der Ergebnisse zu gewährleisten. Dieser Schritt geht allerdings mit dem Verlust von Transparenz und Detailinformationen einher (UN 2007).

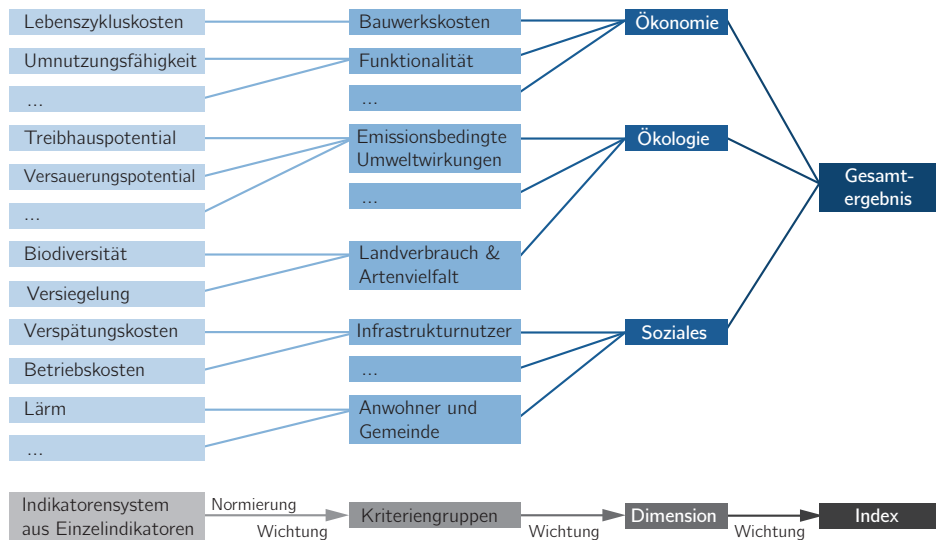


Abbildung 2.5: Beispielhafte Darstellung eines Kriterienbaums mit verschiedenen Hierarchieebenen und den notwendigen Schritten für die Aggregation zu einem Index

Die Normierung der Indikatoren dient dazu, die verschiedenen Skalen der Indikatoren vergleichbar zu machen, indem die Bandbreite standardisiert wird (MAYER 2008). Da-

bei können wie im Bewertungssystem BNB (BMVBS 2013b) vordefinierte stetige oder diskrete Bewertungsmaßstäbe verwendet und auf die Ergebnisbandbreite zwischen minimal und maximal erreichbarer Indikatorausprägung normiert werden (MATEUS und BRANGANÇA 2011). Der minimale Indikatorwert entspricht dann einer Zielerreichung von 0 % und der maximale Indikatorwert einer Zielerreichung von 100 % bzw. umgekehrt. Weitere Methoden zur Normierung sind in NARDO et al. (2005) zusammengefasst. Im Zuge der weiteren Zusammenführung können Wichtungsfaktoren eingesetzt werden, um eine unterschiedliche Bedeutung einzelner Indikatoren oder Kriterien auszudrücken. Die Definition der Wichtungsfaktoren ist dabei oftmals politisch motiviert, idealerweise sollten die Indikatoren und die Wichtungen allerdings auf wissenschaftlichen Erkenntnissen aufbauen und aus der Wissenschaft heraus entstehen (RAMETSTEINER et al. 2011).

Die Hierarchie eines Indikatorensystems bzw. eines Nachhaltigkeitsindizes lässt sich in einem Kriterienbaum darstellen, wie er in Abbildung 2.5 zu finden ist. Die Art der verwendeten Indikatoren, die Auswahl von Kriteriengruppen und der Grad der Aggregation hängt von dem Ziel des zu gestaltenden Systems ab. Auf existierende Indikatorensysteme und Nachhaltigkeitsindizes für Infrastrukturen wird in Abschnitt 2.3.2 eingegangen.

### 2.2.3 Analysemethoden

Im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen haben sich eine Reihe von Methoden herausgebildet, deren Berechnungsergebnisse als Indikatoren in den drei Nachhaltigkeitsdimensionen verwendet oder die zur Aggregation von Indikatoren eingesetzt werden können. Diese Methodensammlung kann umgangssprachlich als „Instrumentenkasten der Nachhaltigkeitsanalyse“ bezeichnet werden. Die Vorteile, Schwachpunkte und Anwendungsgrenzen der einzelnen Verfahren müssen allerdings bekannt sein, um bei Kombination mehrerer Instrumente geeignete Systemgrenzen festlegen und eine Abschätzung der Ergebnisqualität treffen zu können. Eine Zusammenstellung von Methoden ist in verschiedenen Quellen zu finden, siehe beispielsweise AHLROTH et al. (2011), JÄGER und KARGER (2004), NESS et al. (2007) und SINGH et al. (2009). Diese Quellen verwenden eine Vielzahl an unterschiedlichen Klassifizierungsschemata, so dass keine einheitliche Kategorisierung für in der Nachhaltigkeitsanalyse verwendbarer Methoden existiert. Die im folgenden erstellte Methodenübersicht orientiert sich an der in NESS et al. (2007) beschriebenen Klassifizierung.

Abbildung 2.6 liefert eine Zusammenstellung von für die Bewertung von Infrastrukturbauwerken wichtigen Methoden. Die Übersicht erhebt allerdings keinen Anspruch auf

Vollständigkeit, da für viele Methoden Varianten existieren, die ähnliche Analyseziele haben, aber an bestimmte Randbedingungen oder Anwendungsfelder angepasst sind. Auch ist eine Kombination von Methoden zu einer eigenständigen neuen Methode denkbar. Als Beispiel ist die umweltbezogene Kostenrechnung zu nennen, die z. B. Ergebnisse einer Produktökobilanz mit Hilfe von Monetarisierungsverfahren in Geldeinheiten umrechnet und so eine Integration in die Produktlebenszykluskostenrechnung ermöglicht (JÄGER und KARGER 2004).

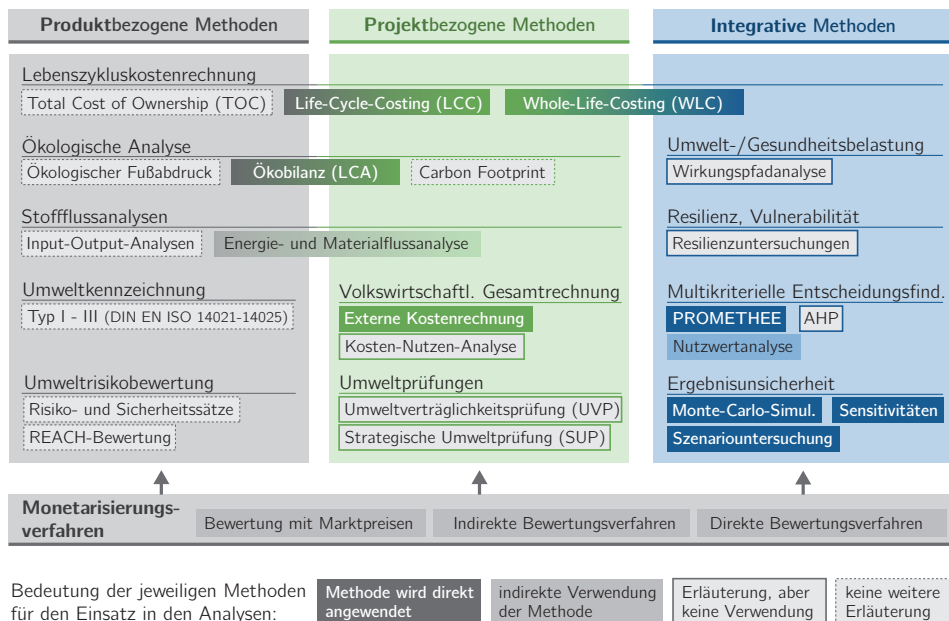


Abbildung 2.6: Gliederung von im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen einsetzbaren Methoden aufbauend auf Ness et al. (2007)

In dieser Arbeit wird der Schwerpunkt auf Methoden bzw. Methodenkombinationen gelegt, deren Berechnungsergebnisse als abstrakte Leistungsindikatoren (Definition siehe Abschnitt 2.2.2) in der Nachhaltigkeitsanalyse von Infrastrukturprojekten verwendet werden können. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisveränderungen bei Anpassung der Eingangsparameter detailliert darzustellen und Entscheidungsgrundlagen abzuleiten. Die in den folgenden Kapiteln direkt und indirekt angewendeten Methoden sind in Abbildung 2.6 hervorgehoben und werden jeweils in den Kapiteln erläutert, in denen die Anwendung erfolgt. Es findet eine Konzentration auf projektbezogene und integrative Methoden statt, da diese für die Vergleiche von Ausführungsvarianten verwendet werden

können. Die zur Produktbewertung existierenden Methoden spielen in dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle, werden allerdings teilweise als Eingangswerte für Berechnungen auf der Bauwerksebene verwendet. Als Beispiel sind Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte zu nennen, welche der Umweltkennzeichnung Typ III entsprechen (DIN EN ISO 14025: 2010) und die als Eingangswerte für die Ökobilanzierung von Bauwerken dienen. Auch die Energie- und Materialflussanalyse kann zur Bestimmung von Eingangsgrößen für die Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung verwendet werden. Die Anwendung der beiden letztgenannten Methoden kann damit sowohl für einzelne (Bau-)Produkte als auch auf Projektebene erfolgen. Das Whole-Life-Costing – analog der Definition in ISO 15686-5 (2008) – ist eine Erweiterung der Lebenszykluskostenrechnung und schließt unter anderem externe Kosten, Finanzierungskosten und Einnahmen mit ein, weshalb es sowohl als projektbezogene als auch als integrative Methode eingestuft werden kann.

Monetarisierungsverfahren zur Berechnung von Monetarisierungsfaktoren werden in dieser Arbeit nicht direkt verwendet, sondern es werden die Ergebnisse existierender Studien ausgewertet, in denen die Verfahren angewendet wurden. Darauf aufbauend werden Grenzkostensätze bestimmt und als Eingangswerte für die externe Kostenrechnung benutzt. Auf diesen Themenkomplex wird ausführlich in Kapitel 3 eingegangen.

### 2.2.4 Gliederungssystematik

Die oben beschriebenen Nachhaltigkeitsindikatoren und Bewertungsmethoden können auf unterschiedliche Weise unter dem Leitbild „Nachhaltigkeit“ zusammengeführt werden. Je nach Einsatzziel und -gebiet haben sich verschiedene Klassifikationen herausgebildet, die Überschneidungen aufweisen. Diese können durch einen Würfel visualisiert werden, wobei der Gesamtwürfel als Konzept der nachhaltigen Entwicklung definiert wird. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt kann dieser Würfel unter verschiedenen Blickwinkeln mit Leben gefüllt werden. Alle diese Klassifikationen schließen sich gegenseitig nicht aus, sondern sind als sich ergänzende Betrachtungsweisen zu sehen, die in Wechselwirkung miteinander stehen. Je nach Analyseziel können eine oder mehrere Seiten des in Abbildung 2.7 dargestellten Würfels zur Einordnung von Nachhaltigkeitsanalysen und -maßnahmen verwendet werden.

So ist eine Einteilung in die drei Nachhaltigkeitsdimensionen möglich, die auf der Oberseite des Würfels zu sehen sind. Diese drei Dimensionen entsprechen den Handlungsfeldern, die an die Politik und die Wirtschaft adressiert werden sollten, um eine nachhaltige

Entwicklung zu unterstützen (MEISTER et al. 1997). Eine weitere Möglichkeit der Klassifikation ist die Bildung von Indikatoren- bzw. Kriteriengruppen, die in dem Anwendungsfeld des Bauwesens regelmäßig verwendet werden.

Bei den Kriteriengruppen ist dabei insbesondere der angelsächsische Ansatz und der deutsche Ansatz zu unterscheiden, beide sind auf der Vorderseite des Würfels in Abbildung 2.7 aufgelistet. Die angelsächsische Struktur verwendet dabei eine große Anzahl an verschiedenen Gruppen und orientiert sich an konkreten Wirkungsbereichen (Landnutzung, Materialeinsatz, Transport etc.). Die deutsche Struktur übernimmt als Grundgerüst die drei Nachhaltigkeitsdimensionen und ergänzt diese um Querschnittsklassen, die vor allem technische, funktionale und prozessuale Aspekte beinhalten. Der deutsche Ansatz ist dabei, verglichen mit dem englischen, deutlich konzeptioneller und erschwert den direkten Vergleich des Nachhaltigkeitsbewertungssystems mit denen anderer Länder. Zu beachten ist dabei, dass die Gruppen der ökonomischen, ökologischen und sozialen Qualität beim deutschen Ansatz um weitere Gruppen ergänzt werden, um eine ganzheitliche Betrachtung zu gewährleisten. Damit entspricht die Kriteriengruppe „Ökonomische Qualität“ nicht vollständig dem Handlungsfeld, das in der ökonomischen Nachhaltigkeitsdimension adressiert wird.

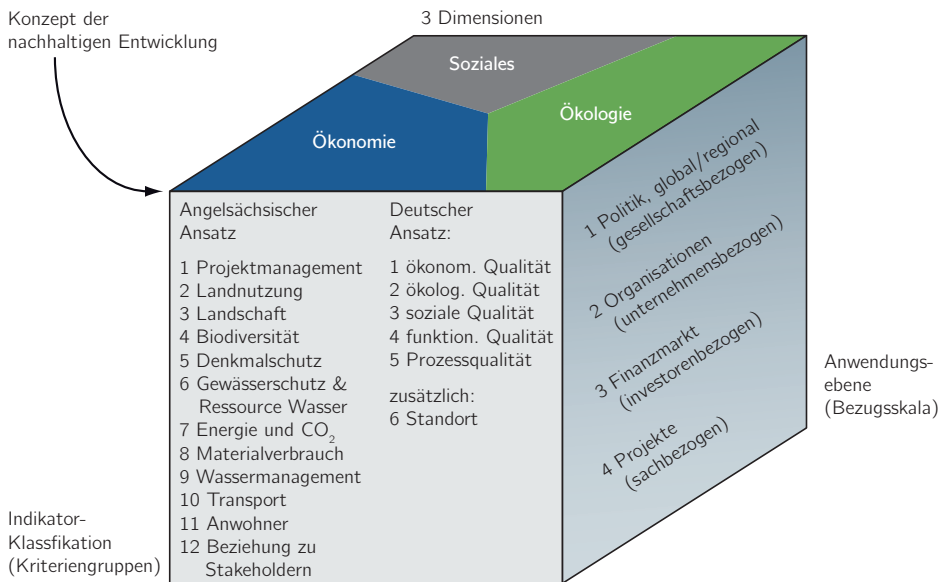


Abbildung 2.7: Klassifikationsmöglichkeiten des Konzepts der nachhaltigen Entwicklung aufbauend auf Zinke et al. (2012b)

Eine dritte Unterscheidungsmöglichkeit bieten die Anwendungen, für die die Indikatorensysteme entworfen werden. Indikatorensysteme können nach der von FIDIC (2004) vorgeschlagenen Gliederung dabei in folgende Anwendungsebenen eingeteilt werden:

- Indikatorensysteme zur Unterstützung von politischen Entscheidungen, die Anwendung kann auf globaler Ebene stattfinden, z. B. mit Indikatoren der „Commission on Sustainable Development“ (UN 2007), oder es findet eine Ausrichtung auf eine regionale Anwendung statt, wie z. B. bei den deutschen Indikatoren zur nachhaltigen Regionalentwicklung (BBSR 2011).
- Organisationsbezogene Indikatoren, die zur Bewertung von Industrieunternehmen eingesetzt werden, z. B. auf Grundlage der „Global Reporting Initiative“ (GRI 2013).
- Ausrichtung der Indikatoren auf den Finanzmarkt und Investoren, z. B. zur Kennzeichnung von „Green Funds“ (DJSI 2013).
- Indikatorensysteme zur Bewertung des Beitrags zur nachhaltigen Entwicklung von Projekten, auf die existierenden projektbezogenen Ansätze für Infrastrukturen wird in Abschnitt 2.3.2 im Detail eingegangen.

An dieser Auflistung wird ersichtlich, dass eine Reihe an Indikatorensystemen existiert, die sich aufgrund ihrer spezifischen Ausrichtungen unterscheiden und deren Bezugsskala von global bis projektbezogen reicht. Im Rahmen der weiteren Untersuchungen wird ausschließlich auf projektbezogene Ansätze und Indikatoren eingegangen, die weiteren Ebenen werden ausgeklammert. Über die vorgestellten Klassifikationsmöglichkeiten hinaus sind weitere denkbar, beispielsweise die Unterteilung nach Strategien, mit denen eine nachhaltige Entwicklung erreicht werden kann (ZINKE et al. 2012b). Unterschieden werden kann hierbei Effizienz, Suffizienz und Konsistenz. Effizienz bezeichnet die Strategie der bestmöglichen Ressourcenverwendung, Suffizienz beschreibt die Ressourceneinsparung durch geeignetes Nutzerverhalten und Konsistenz bezieht sich auf die Vereinbarkeit von technischen und natürlichen Stoffströmen, so dass keine gegenseitige negative Beeinflussung stattfindet (HUBER 1995).

### **2.3 Nachhaltigkeitsanalysen von Infrastrukturen**

Die konzeptionelle Entwicklung von Nachhaltigkeitsanalysen für Infrastrukturbauwerke begann im Vergleich zum Hochbau deutlich später und ist noch nicht abgeschlossen. Allerdings existieren derzeit bereits einige Bewertungs- und Indikatorensysteme, die auf die

spezifischen Randbedingungen von Infrastrukturbauwerken bzw. von Brücken ausgerichtet sind. In diesem Abschnitt werden diese Ansätze beschrieben und eingeordnet. Dabei wird zwischen in der Praxis eingesetzten Bewertungssystemen, Forschungsansätzen, einzelnen Bewertungsmethoden, normativen Vorgaben und Richtlinien unterschieden.

Im Vorfeld der Einordnung existierender Ansätze wird auf die Besonderheiten von Infrastrukturbauwerken eingegangen, wobei besonders Verkehrsinfrastrukturen im Fokus stehen. Alle Inhalte werden verwendet, um abschließend einen Untersuchungsrahmen für die in den folgenden Kapiteln durchgeführten Analysen zu definieren.

### 2.3.1 Besonderheiten von Infrastrukturbauwerken

Gegenüber dem Hochbau weisen Infrastrukturbauwerke einige Besonderheiten auf, die im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung zu deutlichen Unterschieden in der Indikatorenauswahl sowie der Gestaltung des Indikatorensystems führen können. Aus diesem Grund lassen sich die Erkenntnisse aus dem Hochbau nicht ohne Weiteres auf Infrastrukturen übertragen. Die vier wichtigsten Sachverhalte, die eine verglichen mit dem Hochbau angepasste Bewertung von Infrastrukturbauwerken erforderlich machen, sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Es ist zu erkennen, dass eine möglichst frühzeitige Integration von Nachhaltigkeitsaspekten in den Planungsprozess stattfinden sollte, da zu diesem Zeitpunkt sowohl der Prozess an sich als auch der Bauwerksentwurf an Nachhaltigkeitszielen ausgerichtet werden können. Gleichzeitig muss sich die Bewertung in den öffentlich-rechtlich geregelten Planungsablauf einpassen. Des Weiteren gibt es für Verkehrsinfrastrukturen keinen ausgeprägten Markt, so dass eine Auszeichnung mit einem Gütesiegel im Rahmen einer Labelzertifizierung nicht zu einer Erhöhung des Marktwertes führt (ZINKE und UMMENHOFER 2011). Außerdem wird für den Infrastrukturnutzer und die Öffentlichkeit kein Mehrwert durch ein Gütesiegel generiert.

Auswirkungen, die ein Infrastrukturbauwerk auf seine direkte und weitere Umgebung ausübt, lassen sich durch externe Kosten quantifizieren. Wie in Kapitel 3 beschrieben, ist diese Methode geeignet, eine sinnvolle Erweiterung der Systemgrenzen vorzunehmen und eine gesamtökonomische Betrachtung durchzuführen (ZINKE et al. 2010). Die Ausweitung der Systemgrenzen ist erforderlich, um aus volkswirtschaftlicher Sicht optimale Entscheidungen zu treffen. Vor allem externe Kosten sind stark von den singulären Verhältnissen an einem Standort abhängig, so dass eine auf die individuellen Standortbedin-

gungen bezogene Bewertung durchgeführt werden sollte (ZINKE et al. 2012a). Wie an der Einordnung der Komplexität der Umsetzung deutlich wird, stellen vor allem die Berechnung der externen Effekte über den gesamten Lebenszyklus sowie die Berücksichtigung von Netzeffekten (sich ergebend aus Lage und Bedeutung eines Bauwerks im Verkehrsnetz) eine Herausforderung dar. Dies hängt zum einen mit der Definition von passenden Eingangsparametern zusammen und ist zum anderen auf viele schwer abbildbare Abhängigkeiten der Parameter untereinander zurückzuführen.

Tabelle 2.1: Spezifische Eigenschaften von Infrastrukturbauwerken und sich daraus ergebende Anforderungen an Nachhaltigkeitsanalysen (Zinke und Ummenhofer 2014)

<b>Sachverhalt</b>	<b>Eigenschaften von Infrastrukturbauwerken</b>	<b>Bedeutung für Nachhaltigkeitsanalysen</b>	<b>Komplexität der Umsetzung</b>
Ziel der Bewertung	Im Gegensatz zum Hochbau existiert kein ausgeprägter Markt und eine Bewertung nach Baufertigstellung (Ausstellen eines Gütesiegels) hat für die Infrastrukturnutzer kaum einen Mehrwert	Eine Labelzertifizierung ist nicht sinnvoll, daher Variantenvergleich in einer frühen Planungsphase (größte Beeinflussbarkeit des Entwurfs und damit Reduzierbarkeit der Auswirkungen im Lebenszyklus)	Niedrig
Öffentliches Eigentum	Einbindung in einen öffentlich-rechtlich geregelten Planungsablauf (Beispiel Bundesverkehrswegeplan, Kosten-Nutzen-Analysen, Ausschreibungen)	Anpassung der Bewertungskriterien an die zu erhebenden Eingangsdaten im gesamten Planungsablauf; Fortschreibung und Detaillierung der Informationen	Mittel
Funktionserfüllung	Ausfälle und Funktionsbeeinträchtigungen können zur Entstehung von hohen externen Effekten führen, die nicht vom Betreiber aber der Gesellschaft zu tragen sind	Berücksichtigung von direkten und indirekten Auswirkungen, um ein gesamtwirtschaftliches Optimum zu gewährleisten	Mittel bis hoch
Standortabhängigkeit	Standortfaktoren können einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Ergebnisse haben (insbesondere durch die Entstehung von externen Effekten, aber auch durch Bodenverhältnisse und Expositionsrisiken für Extremereignisse)	Nur standortbezogener Variantenvergleich, nach Möglichkeit unter Berücksichtigung von Netzeffekten, was die Anpassung/Ausweitung der Systemgrenzen erfordert	Hoch

Die hier hervorgehobenen vier Sachverhalte lassen eine direkte Übertragung von existierenden Bewertungsansätzen des Hochbaus auf Infrastrukturen nicht zu. Dennoch wird ein solches Vorgehen in Deutschland diskutiert. Die Veröffentlichung von GRAUBNER und MIELECKE (2012) ist ein Beispiel für einen Systemvorschlag für Infrastrukturen, der sich sehr stark an den Vorgaben existierender Hochbau-Nachhaltigkeitsbewertungssysteme orientiert und eine moderate Anpassung von bestehenden Hochbau-Kriteriensteckbriefen vornimmt. Allerdings wird auch hier auf die Notwendigkeit der Integration von externen



Effekten sowie eine Anwendung in der frühen Planungsphase hingewiesen, so dass zwei der wichtigsten Besonderheiten von Infrastrukturen Rechnung getragen wird.

### 2.3.2 Bestehende Bewertungsansätze

In Deutschland und international lassen sich einige bestehende Bewertungsansätze für Infrastrukturbauwerke finden. Allerdings ist es von großer Bedeutung, den Anwendungsbereich der jeweiligen Ansätze zu definieren, da bei unterschiedlichen Typen von Infrastrukturen eine angepasste Analyse stattfinden muss. So erfordern beispielsweise Flughäfen andere Bewertungsmethoden, Analyseaspekte und Bewertungssystemgestaltungen als Straßen und Brücken. Daher existieren auch viele Projekte, die sich mit den Besonderheiten einer Art von Infrastruktur beschäftigen, beispielsweise seien Staudämme (WCD 2000), städtische Wasserver- und -entsorgungssysteme (SAHELY et al. 2005), Elektrizitätsleitungen (DASGUPTA und TAM 2005), Offshore-Windenergieanlagen (SCHAUMANN et al. 2011) und Bahninfrastrukturen (NIBA 2006) genannt.

In Ergänzung zu der allgemeinen Einführung in Abbildung 2.2 wird im Folgenden eine detaillierte Einordnung von Ansätzen vorgenommen, die sich zur Analyse und Bewertung von Verkehrsinfrastrukturen und insbesondere Brücken eignen. Hierfür sind im Gegensatz zu anderen Infrastrukturarten in der Vergangenheit bereits mehrere markt- und forschungsbezogene Ansätze entstanden, da Verkehrsinfrastrukturen eine hohe gesellschaftliche Bedeutung besitzen, in ihrer Gesamtheit hohe jährliche Instandhaltungskosten erzeugen und eine flächendeckende Verbreitung aufweisen.

#### 2.3.2.1 Marktorientierte Bewertungssysteme

Als marktorientiertes Bewertungssystem wird hier eine in sich abgeschlossene und aufeinander abgestimmte Sammlung von Indikatoren verstanden, die bereits kommerziell zum Einsatz kommt. Weltweit existieren derzeit drei Systeme, die für sich in Anspruch nehmen, den unterschiedlichen Bewertungsanforderungen verschiedener Arten von Infrastrukturen gerecht zu werden. Das älteste System ist das im Jahr 2003 auf dem Markt eingeführte „CEEQUAL“, welches aus England stammt und eine Vorreiterrolle einnimmt (CEEQUAL 2010). Im Jahr 2012 sind zwei weitere Infrastrukturbewertungssysteme hinzugekommen, das amerikanische „Envision“ (ENVISION 2012) und das australische „Infrastructure Sustainability Rating Tool“ (SPRIGG 2012). Die wichtigsten Eigenschaften dieser drei Systeme sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt. Die erste Version des amerikani-

schen Systems „Envision“ entstand in Zusammenarbeit mit der CEEQUAL Ltd. und der FÉDÉRATION INTERNATIONALE DES INGÉNIEURS CONSEILS (FIDIC), die Weiterentwicklung zu der zweiten Version fand dann in Zusammenarbeit mit der UNIVERSITÄT HARVARD statt. Das australische System ist unabhängig von den beiden anderen entwickelt worden. Zusätzlich kann das System „SPeAR“ der Firma ARUP genannt werden (ARUP 2012), welches nach eigener Beschreibung allerdings sowohl auf Gebäude als auch auf Infrastrukturen angewendet werden kann und somit kein speziell auf Infrastrukturen abgestimmtes System ist. Deshalb wird es hier nicht weiter betrachtet.

Tabelle 2.2: Beschreibung der kommerziellen Bewertungssysteme für Infrastrukturen, die nicht auf einen Infrastrukturtyp spezialisiert sind

Aspekt	CEEQUAL	Envision	IS Rating Scheme
Jahr des Markteintritts	2003	2012	2012
Ursprungsland	England	USA	Australien
Aktuelle Version	Version 5 (erstmalig auch als internationale Version)	Version 2.0	Version 1.0
Programmhalter	CEEQUAL Ltd.	Institute for Sustainable Infrastructure (ISI)	Infrastructure Sustainability Council of Australia
Indikatoren	225 (Kern- und Zusatzindikatoren in Version 4.1)	55 Indikatoren und 5 zus. Indikatoren für Innovationen	52 Indikatoren
Gliederungssystematik	angelsächsischer Ansatz mit 12 Indikatorengruppen	angelsächsischer Ansatz mit 14 Indikatorengruppen	angelsächsischer Ansatz mit 15 Indikatorengruppen
Bewertungsklassen	ja (max. 7 Klassen mit dazugehöriger Punktzahl)	ja (max. 5 Klassen mit dazugehöriger Punktzahl)	ja (max. 3 Klassen mit dazugehöriger Punktzahl)
Gütesiegelalternativen	Zertifizierung möglich für 6 verschiedene Projektteams und -phasen	Zertifizierung des Projekts in der Planungsphase	Vorzertifizierung Entwurf, Zertifizierung fertiges Bauwerk und Betriebszertifizierung

Unterstrichen werden muss, dass in allen drei Fällen eine eigenständige Systementwicklung stattfand, die unabhängig von den für den Hochbau zuständigen Institutionen war. Dabei haben sich eigenständige Verbände gegründet, die von bestehenden Interessensverbänden und der Industrie unterstützt wurden und auf die Besonderheiten von Infrastrukturbauwerken abgestimmte Bewertungssysteme entwickelten. Das Ergebnis ist, dass in den drei genannten Ländern Hochbau- und Infrastrukturbewertungssysteme voneinander entkoppelt sind.

Alle drei Nachhaltigkeitsbewertungssysteme verwenden den in Abbildung 2.7 beschriebenen angelsächsischen Ansatz der Indikatorenklassifizierung und haben eine Gütesiegelvergabe nach erfolgreicher Prüfung der Bewertung durch einen externen Revisor zum

Ziel. Sie arbeiten alle mit Kernindikatoren und optional anwendbaren bzw. streichbaren Indikatoren, um verschiedene Infrastrukturarten möglichst sachgerecht abzubilden. Die Bewertung erfolgt anhand von vordefinierten Ergebnisklassen, die eine textliche Beschreibung des Erfüllungsgrades der jeweiligen Indikatoren darstellen und eine relativ einfache Einordnung der im Projekt vorliegenden Situation zulassen. Als Beispiel kann die Frage aus CEEQUAL (2010) genannt werden, ob ein Baustellenmanagementplan zur Minimierung der Verkehrsbeeinträchtigungen existiert. Als Ergebnisklassen sind die Optionen „es existiert kein Baustellenmanagementplan“, „ein Entwurf ist angefertigt worden“ und „der Entwurf ist vollständig implementiert“ vorgegeben, mit denen der Ist-Zustand des Projekts abgeglichen wird. Die drei in Tabelle 2.2 genannten Systeme verwenden überwiegend Indikatoren, die als binäre Zustandsindikatoren gemäß der Definition in Abschnitt 2.2.2 beschrieben werden können. Sie ermöglichen eine einfache Anwendung im Rahmen des Projektmanagements und bilden einen Leitfaden für das Projektteam, welche Themenbereiche untereinander diskutiert werden und welche Fragen beantwortet werden sollten.

In Ergänzung zu den breit aufgestellten Ansätzen für verschiedene Typen von Infrastrukturen existieren eine Reihe von Systemen, die sich vorwiegend auf die Nachhaltigkeitsbewertung von Straßen und den Alternativenvergleich von Straßentrassen fokussieren. Als Beispiel für Letzteres kann das schweizerische System „NISTRA“ (WALTER et al. 2003) genannt werden, welches bei größeren Straßeninfrastrukturprojekten zur Anwendung kommt und als eine um Nachhaltigkeitsindikatoren erweiterte Kosten-Nutzen-Analyse verstanden werden kann. Eine ausführliche Übersicht über verschiedene Ansätze für Straßeninfrastrukturen, die im Rahmen des ERAnet-Projekts „Sustainability – National Road Administrations“ entstand, ist in VANZERR et al. (2012) zu finden. Für Straßen existieren im Jahr 2013 international mindestens zwölf Systeme, die überwiegend von für Straßeninfrastruktur zuständigen Behörden entwickelt worden sind und entweder eine Selbstevaluation oder eine Zertifizierung durch einen unabhängigen Dritten vorsehen. Mit einer Ausnahme wird flächendeckend eine Normierung und Wichtung der einzelnen Indikatoren vorgenommen, so dass ein Gesamtergebnis errechnet und ein Gütesiegel vergeben werden kann (VANZERR et al. 2012). Es ist damit überall eine Gestaltung gewählt worden, die eine direkte Anwendbarkeit in der Praxis gewährleistet. Brücken werden nur vereinzelt bei der Indikatorenwahl explizit berücksichtigt, als Beispiel hierfür kann das Zertifizierungsprogramm „GreenLITES“ des NEW YORK STATE DEPARTMENT OF TRANSPORTATION genannt werden (NYSDOT 2010). In den meisten Systemen werden Brücken zwar erwähnt, es erfolgt aber keine die individuellen Besonderheiten von Brücken berücksichtigende Systemanpassung, siehe beispielhaft GREENROADS (2011).

## 2 Nachhaltigkeit

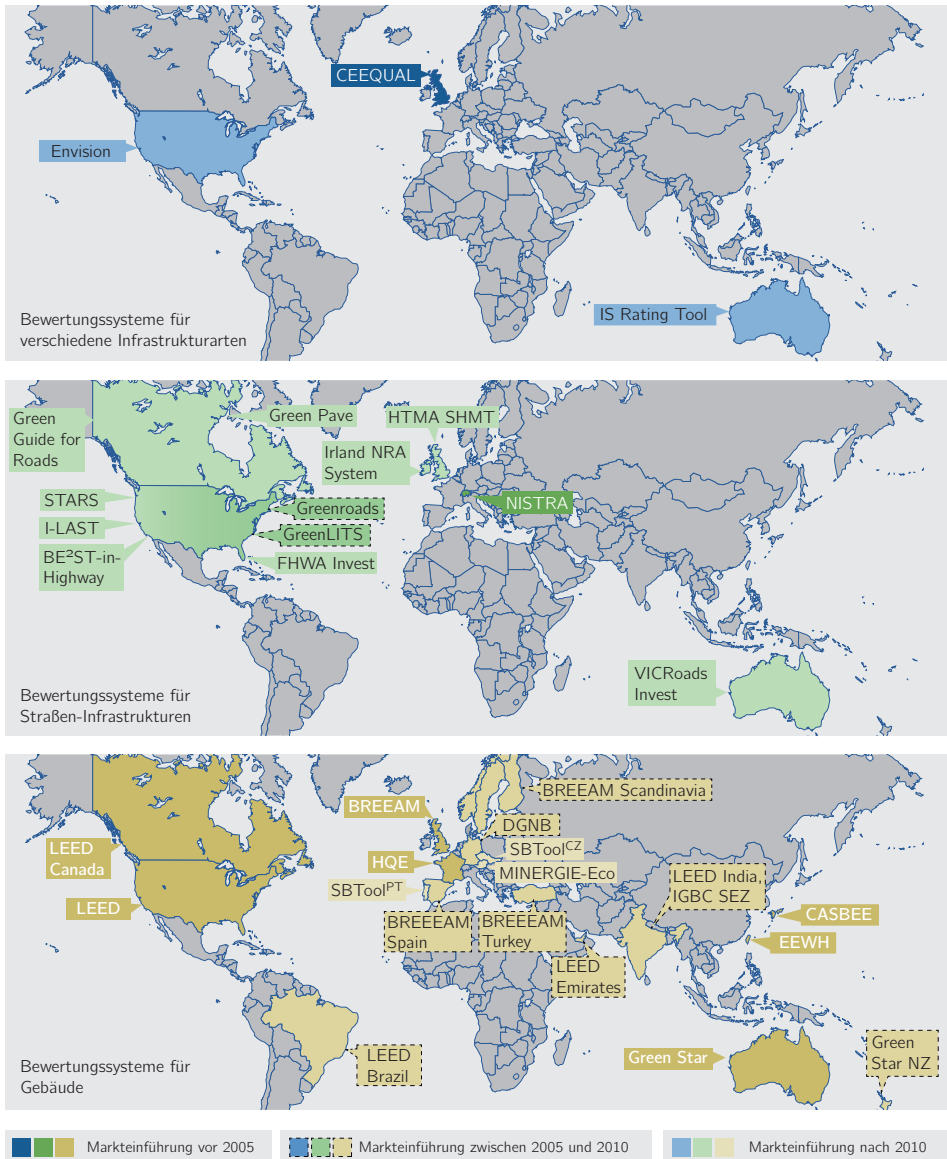


Abbildung 2.8: Vergleich der wichtigsten international existierenden Nachhaltigkeitsbewertungssysteme anwendbar für verschiedene Arten von Infrastrukturen (oben), für Straßen-Infrastrukturen (mittig, aufbauend auf den Daten aus VanZerr et al. (2012)) und für Gebäude (unten, aufbauend auf den Daten aus Ebert et al. (2010))

Als kompakter Überblick sind in Abbildung 2.8 die wichtigsten Nachhaltigkeitsbewertungssysteme der marktorientierten Ansätze anwendbar auf verschiedene Arten von Infrastrukturen und die auf dem Markt existierenden Systemansätze für Straßen dem Status Quo für Gebäude gegenübergestellt. Es ist erkennbar, dass die Hochbauansätze im Durchschnitt deutlich älter sind und eine räumlich deutlich breitere Verteilung vorliegt. Für Straßen existieren zwar eine ganze Reihe an Bewertungssystemen, die meisten finden sich aber in den USA sowie Australien und Kanada. Dort werden sie entweder von Hochschulen oder auf Landesebene arbeitenden Behörden erarbeitet und betreut. Des Weiteren sind mit wenigen Ausnahmen alle Infrastruktur- und Straßenbewertungssysteme nach 2010 entstanden und weisen daher noch keine hohe Marktdurchdringung auf.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es für Infrastrukturbauwerke bereits eine Reihe von praxisorientierten Systemansätzen gibt, keine speziell auf Brückenbauwerke angepassten Bewertungssysteme existieren und alle vorgestellten Systeme für eine möglichst einfache Anwendung konzipiert sind. Die verwendeten Indikatoren arbeiten vorwiegend mit einer vordefinierten Klasseneinteilung und formulieren Leitfragen, die zur Einbeziehung aller Projektbeteiligten dienen und die Diskussion der wichtigsten Nachhaltigkeitsaspekte bis zur Baufertigstellung fördern sollen. Speziell für die Steigerung der Akzeptanz einer Nachhaltigkeitsbewertung auf dem Markt ist dieses Konzept sinnvoll, es lässt allerdings auch gleichzeitig Lücken und Ungenauigkeiten entstehen. So findet i. d. R. keine Verwendung von abstrakten Leistungsindikatoren statt, die mit Hilfe von Modellen verschiedene Zusammenhänge und Projektaspekte detailliert abbilden. Beispielsweise wird im Handbuch des Systems „Envision“ die Ökobilanzierung als geeignetes und starkes Instrument zur Abbildung von Umweltwirkungen beschrieben, diese Methode ist allerdings nicht in das Bewertungssystem implementiert (ENVISION 2012). Aus diesen Gründen eignen sich die vorgestellten Systemansätze nicht, um die in Abschnitt 1.2 definierte Zielsetzung zu erreichen.

### 2.3.2.2 Forschungsansätze

Im Gegensatz zu den marktorientierten Bewertungssystemen sind Forschungsaktivitäten im Themenfeld Infrastruktur-Nachhaltigkeitsbewertung deutlich stärker spezialisiert und fokussieren sich in der Regel auf einen Infrastrukturstyp oder eine Bewertungsmethode. Im Folgenden werden die Ansätze dargestellt, die sich speziell mit Brückenbauwerken beschäftigen bzw. deren Inhalte für die Entwicklung von Bewertungsansätzen für Brücken zielführend sind. Dabei werden integrative Forschungsprojekte, Projekte mit dem Ziel der

Indikatorenentwicklung und methodenorientierte Ansätze unterschieden. In Anhang B.1 bis B.4 findet sich eine ausführliche Auflistung und Einordnung der wichtigsten Nachhaltigkeitsbewertungsansätze.

*Integrative Forschungsprojekte* zeichnen sich i. d. R. dadurch aus, dass vor allem Methoden zur Berechnung von abstrakten Leistungsindikatoren angewendet, Variantenvergleiche sowie Sensitivitätsanalysen durchgeführt und Indikatoren mit der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung (engl. Multi Criteria Decision Making, MCDM) zusammengeführt werden. Beispiele hierfür sind ETSI (2009); SBRI (2013) und das deutsche Forschungsprojekt „NaBrü“ (KUHLMANN et al. 2014). Ein vergleichbarer Ansatz ist auch in der Dissertation von GERVÁSIO (2010) gewählt worden, der darüber hinaus Unsicherheiten in die Analysen miteinbezieht. Aus dem Sonderforschungsbereich FOGIB (1997) heraus entstand u. a. eine Indikatorenliste für den Vergleich von Brückenentwürfen, die allerdings größtenteils aus quantitativen Zustandsindikatoren oder binären Indikatoren besteht. In keinem der genannten Projekte werden feste Wichtungsfaktoren zur Bildung von Indizes entwickelt.

Die *Indikatorenentwicklung* für Brücken in Deutschland basiert auf der Indikatorenzusammenstellung in FOGIB (1997) und wird derzeit von einer interdisziplinären Arbeitsgruppe (GRAUBNER et al. 2010) unter Leitung der BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN (BASt) weiterentwickelt. Bis zum Jahr 2015 sind die Arbeiten über ein Entwurfsstadium allerdings nicht hinausgekommen. Ein vergleichbarer proprietärer Ansatz der Firma ATKINS ist in England entwickelt und beispielhaft angewendet worden (HENDY und PETTY 2012). Über die brückenspezifischen Indikatorenansammlungen hinaus existieren eine Reihe an Fachveröffentlichungen, die Indikatorenlisten zur Bewertung von Infrastrukturen anfertigen. Dabei sind die Ansätze zu unterscheiden, die keine Gewichtung der Indikatoren untereinander vornehmen (SAHELY et al. 2005; SÁNCHEZ und LÓPEZ 2010; WILLETTS et al. 2010; YAO et al. 2011) und die eine Möglichkeit zur Berechnung eines Gesamtindex schaffen (GRIFFITHS 2007; KOO et al. 2009; LÓPEZ und SÁNCHEZ 2011; UGWU et al. 2006a; UGWU et al. 2006b). Diese Ansätze sind i. d. R. sehr breit aufgestellt und fokussieren sich auf die Anwendung von Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung. Auf dieses Themengebiet wird detaillierter in Kapitel 7 eingegangen.

*Methodenorientierte Ansätze* sind für Brückenbauwerke in einer sehr großen Anzahl vorhanden. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass eine Bewertungsmethode detailliert untersucht, weiterentwickelt oder angewendet wird. Prinzipiell können dabei alle in Abbildung 2.6 genannten Methoden einzeln für Brücken verwendet werden, weswegen auch kein vollständiger Überblick über alle bestehenden Ansätze gegeben werden kann. Am

weitesten verbreitet sind dabei Lebenszykluskostenanalysen, die sowohl konzeptionell (BRÜHWILER und ADEY 2005; SCHACH et al. 2006) als auch anwendungsorientiert (HEITEL et al. 2008; JODL 2010) durchgeführt werden. Teilweise werden über die reinen brückenbezogenen Kostenkomponenten hinaus auch schon Nutzerkosten in die Betrachtungen integriert (NCHRP 2003; THOFT-CHRISTENSEN 2009). Im Bereich der Ökobilanzierung ist in den letzten Jahren eine Zunahme der durchgeführten Analysen zu verzeichnen, siehe beispielsweise HETTINGER et al. (2011) und HLSV (2010). Der Großteil der Arbeiten zur Ökobilanzierung von Brückenbauwerken findet allerdings in den oben genannten integrativen Forschungsprojekten statt.

Die Zusammenstellung zeigt, dass bereits einige Forschungsansätze existieren, die sich mit Aspekten der Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken beschäftigen. Viele Studien legen dabei einen Schwerpunkt auf die konstruktive Durchbildung, untersuchen aber Wechselwirkungen zwischen Bewertungsergebnissen nur ansatzweise und beziehen vor allem Auswirkungen auf Nutzer und die Öffentlichkeit nur am Rande ein. Diese Lücke soll im Rahmen der weiteren Betrachtungen geschlossen werden.

### 2.3.2.3 Normung

Im Bereich der Normungsdokumente hat sich seit dem Jahr 2010 eine Reihe an Unterlagen zum Themenbereich Nachhaltigkeit herausgebildet. Im Folgenden wird vor allem auf die Dokumente eingegangen, die im Spiegelausschuss Nachhaltiges Bauen des DEUTSCHEN INSTITUTS FÜR NORMUNG (DIN) gespiegelt werden. Eine Zusammenstellung ist in Abbildung 2.9 zu finden, wobei sowohl die auf internationaler Ebene (ISO-Ebene) als auch auf europäischer Ebene (CEN-Ebene) bzw. die entsprechenden in Deutschland eingeführten Normen dargestellt werden. Dabei wird die im europäischen Bereich übliche Gliederung in drei Anwendungsebenen aufgegriffen (methodisch-begriffliche Ebene, Produktebene und Bauwerksebene) und wenn möglich zwischen den drei Nachhaltigkeitsdimensionen differenziert. Nicht dargestellt sind Normungsdokumente, die einen allgemeinen methodischen Rahmen spezifizieren, wie die DIN EN ISO 14040 (2009) für Ökobilanzierung oder die DIN 276-4 (2009) für Kosten im Ingenieurbau. Die genauen Langtitel aller Normen sind im Normen- und Richtlinienverzeichnis zu finden.

In Abbildung 2.9 ist zu erkennen, dass besonders auf der methodisch-begrifflichen Ebene viele Grundlagen existieren. Diese beziehen sich überwiegend auf den Gebäudebereich, lassen sich in Teilen aber für die Analyse von Brückenbauwerken einsetzen, vor allem in Bezug auf die ökologische und ökonomische Bewertung der Konstruktion selbst.

Dies gilt genauso für die auf der Produktebene geschaffenen Grundlagen zu Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations – EPD), die in Brücken-Ökobilanzen direkt Anwendung finden können. Die existierenden Normen auf Bauwerksebene sind vollständig auf Gebäude ausgerichtet, auch hier ist allerdings eine Übertragung vorhandener Ansätze auf Brückenbauwerke möglich, beispielsweise in Hinblick auf die in der DIN EN 15978 (2012) vorgenommene Einteilung des Lebenszyklus in verschiedene Lebenszyklusphasen.

	Umweltaspekte	Ökonomische Aspekte	Soziale Aspekte
Methoden, Begriffe	DIN EN 15641-1 (2010): Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Allgemeine Grundlagen		
	DIN EN 15641-2 (2011): Bewertung Umweltqualität	DIN EN 15641-4 (2012): Bewertung ökonomische Qualität	DIN EN 15641-3 (2012): Bewertung soziale Qualität
	Work Item 15641-5: Sustainability assessment of civil engineering works (CEN TC350 WG6) ←		
	ISO 15392 (2008): Sustainability in building construction – General principles, ISO 21932 (2013): Terminology		
	ISO 21929: Sustainability in building construction – Sustainability indicators Part 1 (2011): Framework for the development of indicators for buildings Part 2 (2015): Framework for the development of indicators for civil engineering works ←		
Bauwerks-ebene	DIN EN 15978 (2012): Bewertung umweltbezogene Gebäudequalität	DIN EN 16627 (2013): Bewertung ökonomische Gebäudequalität	DIN EN 16309 (2014): Bewertung soziale Gebäudequalität
	ISO 21931-1 (2010): Environm. assessment of constructions	ISO 15686-5 (2008): Life-cycle-costing for constructed assets	
	ISO 16745 (2015): Building Carbon Metric in the use stage		
Produkt-ebene	DIN EN 15804 (2014): EPD Grundregeln Bauprodukte		
	DIN EN 15942 (2012): EPD Kommunikationsformate		
	ISO 21930 (2007): Environm. declarations of building products		

Legende:

- Eingeführte europäische/ deutsche Norm
- Internationales (ISO) Normungsdokument
- Normungsvorhaben in Bearbeitung
- ← spezielle Ausrichtung auf Infrastrukturen

Abbildung 2.9: Internationale und nationale Normungsdokumente im Themenbereich „Nachhaltigkeit von Bauwerken“ in Anlehnung an die im europäischen technischen Komitee CEN TC 350 verwendete Gliederungssystematik

Um allerdings einen vollständig auf die Besonderheiten von Infrastrukturen ausgerichteten Rahmen zu definieren, ist die Erstellung von infrastrukturenspezifischen Ansätzen notwendig. Diese existieren bisher nur an zwei Stellen. Zum einen ist auf internationaler Ebene die ISO/TS 21929-2 (2015) veröffentlicht worden, zum anderen wird derzeit von der Arbeitsgruppe CEN/TC 350/WG 6 an einer Erweiterung der Normenreihe DIN EN 15641 um eine Infrastrukturkomponente gearbeitet. Beide Initiativen sind derzeit auf eine Anwendung für verschiedene Typen von Infrastrukturbauwerken ausgerichtet und bleiben als Folge inhaltlich eher an der Oberfläche. Infrastrukturenspezifische Besonder-



heiten und Bewertungsgrundlagen werden definiert, allerdings ist der Mehrwert für eine praktische Anwendung im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung von Brücken derzeit noch gering.

Grundsätzlich nehmen alle vorgestellten Normungsdokumente aus dem Bereich „Nachhaltigkeit von Bauwerken“ eine eher schwache Position ein, da die Anwendungspraxis der Nachhaltigkeitsbewertung durch am Markt eingeführte Systeme bestimmt wird und die dort definierten Bewertungsmethoden maßgebend für die Anwender sind. Gleichzeitig sind die Normungsdokumente zeitlich etwas später als die Mehrheit der Nachhaltigkeitsbewertungssysteme entstanden, so dass der Normungseinfluss auf die Inhalte der Bewertungssysteme als eher gering zu bezeichnen ist. Für Brückenbauwerke können die beiden in Abbildung 2.9 definierten infrastrukturenspezifischen Ansätze zwar grundsätzlich berücksichtigt werden, die beiden Ansätze liefern allerdings nicht mehr als einen groben methodischen Rahmen.

### 2.3.2.4 Richtlinien und Vorschriften

Über die normativen Vorgaben hinaus existiert in Deutschland ein ordnungsrechtlicher Rahmen, der die Planung und Erstellung von Brücken regelt. Hier wird im Folgenden insbesondere auf Richtlinien und Vorschriften eingegangen, die Ansätze einer ganzheitlichen Bewertung beinhalten und somit eine Grundlage für eine Nachhaltigkeitsanalyse bereitstellen.

Eine ganzheitliche Sichtweise ist in der EU-Richtlinie 2004/18/EC verankert, die als eine Basis für eine Angebotsbewertung durch einen öffentlichen Auftraggeber u. a. Aspekte wie Funktionalität, Umwelteigenschaften, Ästhetik und Betriebskosten nennt (EP 2004). Bei einer solchen multikriteriellen Vergabe soll nach Möglichkeit die Vorgabe und Kommunikation eines Wichtungsschemas erfolgen. Die deutsche Umsetzung im „Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau“ (HVA B-STB: 2009) ist im Bundesfernstraßenbau verbindlich und definiert mögliche Zusatzkriterien zum wirtschaftlichsten Angebot wie technischer Wert und Gestaltung. Diese müssen wiederum mit einem vorab festgelegten Bewertungsmaßstab in die Gesamtwertung mit eingehen. In beiden Richtlinien sind die Kriterien und die Bewertung allerdings sehr offen gestaltet und eine Integration dieser ist nicht verbindlich geregelt.

Für die vergleichende Wirtschaftlichkeitsbewertung von Brückenbauwerken ist die RI-WI-BRÜ (2007) in Deutschland eingeführt, die eine Grundlage für Entscheidungen beim

Ersatzneubau und der Wahl von Instandsetzungsmaßnahmen bietet. Als grundlegende Bewertungsmethode wird die Lebenszykluskostenrechnung verwendet, es können allerdings auch weitere, qualitativ zu erfassende Kriterien wie Verkehrssicherheit, Gestaltung, Leistungsfähigkeit der Verkehrsführung, Lärmschutz und zusätzliche Umweltaspekte in die Beurteilung integriert und auf einer fünfstufigen Ordinalskala von „sehr gut“ bis „sehr schlecht“ bewertet werden. Eine Monetarisierung von Verkehrseffekten erfolgt nicht. Dies ist aber Inhalt der „Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen“ (EWS: 1997), die im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse volkswirtschaftliche Effekte monetär erfasst. Dieses Themengebiet wird im folgenden Kapitel 3 detailliert erläutert.

Es zeigt sich, dass die Bewertung von Angeboten mit über den Herstellungspreis hinausgehenden Aspekten in den bestehenden Richtlinien und Vorschriften nur unter Verwendung von qualitativen Indikatoren erfolgt. Für andere Planungsphasen existieren schon Ansätze, die Lebenszykluskosten berechnen und beispielsweise Verkehrseffekte in Geldeinheiten quantifizieren. So führt die RI-WI-BRÜ (2007) einen lebenszyklusorientierten Wirtschaftlichkeitsvergleich ein, der allerdings aufgrund seiner pauschalen Ansätze der Nutzungsdauern einzelner Komponenten für die hier angestrebte Tiefe der Nachhaltigkeitsanalysen nur bedingt geeignet ist. Die Untersuchungen hierzu finden sich in Abschnitt 6.3.3.2. Insgesamt liefern die existierenden Richtlinien und Vorschriften eine gute Grundlage für eine Nachhaltigkeitsanalyse von Brückenbauwerken, bedürfen allerdings einer Erweiterung, um eine auf Brückenbauwerke ausgerichtete, ganzheitliche und lebenszyklusorientierte Sichtweise zu gewährleisten.

## 2.4 Definition Untersuchungsrahmen

### 2.4.1 Festlegung

Aufbauend auf den in den vorherigen Abschnitten vorgestellten bestehenden Bewertungsansätzen sowie der methodischen Einordnung von Nachhaltigkeitsanalysen, wird im Folgenden der Untersuchungsrahmen für die in dieser Arbeit durchzuführenden Untersuchungen festgelegt. Es muss vorab immer definiert werden, was das Analyseziel ist, in welcher Phase die Analysen durchgeführt und für welche Zielgruppe die Ergebnisse aufbereitet werden. Nur so kann gewährleistet werden, dass eine richtige Ergebniseinordnung stattfinden kann und Vergleiche mit anderen Studien ermöglicht werden.

Des Weiteren sollten sich vor allem Ansatzentwicklungen für den Brückenbau an den bestehenden öffentlich-rechtlichen Rahmenbedingungen orientieren. Eine Einordnung in den bestehenden Planungsablauf ist erforderlich, um Überschneidungen zu vermeiden und nach Möglichkeit die Fortschreibung von in früheren Planungsphasen schon erhobenen Daten zu ermöglichen.

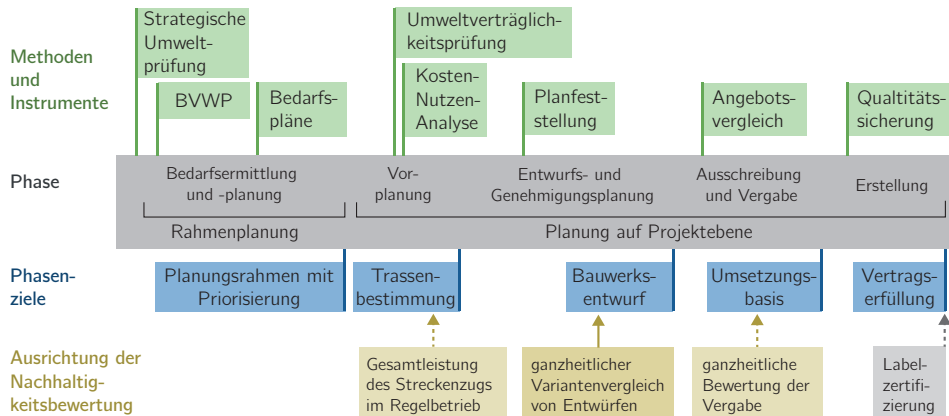


Abbildung 2.10: Verwendete Methoden in verschiedenen Planungsphasen und Einordnung der phasenbezogenen Ziele einer Nachhaltigkeitsbewertung

Mögliche Zeitpunkte von Nachhaltigkeitsanalysen sind in Abbildung 2.10 dargestellt. Die Zuordnung der eingesetzten Methoden und Instrumente zu den einzelnen Planungsphasen basiert dabei auf BMVBS (2013a); BAUMGÄRTNER et al. (2012) und GÜNNIEWIG et al. (2010). Im Rahmen der Trassenfindung in der Phase der *Vorplanung* werden üblicherweise verschiedene Linienführungen von Streckenzügen miteinander verglichen und es muss eine Analyse eines Portfolios unterschiedlicher Arten von Infrastrukturbauwerken stattfinden (Brücke, Straße, Tunnel etc.). Nachhaltigkeitsanalysen können hier über die schon eingesetzten Methoden wie Umweltverträglichkeitsprüfung und Kosten-Nutzen-Analysen hinaus weitere Aspekte berücksichtigen und alle wechselseitigen Auswirkungen in den gesamten Lebenszyklus des Bauwerksportfolios integrieren. Der Variantenvergleich in der *Entwurfs- und Genehmigungsplanung* konzentriert sich auf einzelne Bauwerke und untersucht die Leistungsfähigkeit verschiedener Bauwerksentwürfe. Effekte aus angrenzenden Infrastrukturkomponenten sowie des Bauwerks selbst müssen angemessen berücksichtigt werden, um eine ganzheitliche Analyse zu gewährleisten. Eine ganzheitliche Bewertung in der *Ausschreibungs- und Vergabephase* berücksichtigt nicht nur den reinen Herstellungspreis, sondern bezieht weitere Aspekte im gesamten Lebenszyklus mit

ein. Die im Hochbau übliche Labelzertifizierung nach *Baufertigstellung* ist wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben im Infrastrukturbereich nur bedingt sinnvoll und hier nur der Vollständigkeit halber aufgeführt.

In dieser Arbeit wird ausschließlich der Variantenvergleich auf Bauwerksebene für den Anwendungsfall Straßenverkehrsbrücken untersucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch eine erfolgte Planfeststellung die Bauaufgabe definiert ist, wie beispielsweise Überführung einer sechsspurigen Autobahn mit dem Regelquerschnitt „RQ 35,5“ durch eine Landstraße mit einer definierten Kapazität. Es steht damit nicht die Fragestellung, ob gebaut werden soll, im Vordergrund, sondern wie gebaut werden soll. Daraus ergibt sich, dass vor allem die konstruktionsbedingten und variantenabhängigen Störungen des Regelbetriebs zu untersuchen sind, da der Regelbetrieb bei allen Varianten gleich ist. Diese Störungen werden allerdings nur vollständig erfasst, wenn über das Bauwerk hinausgehende Effekte in die Analysen integriert werden.

Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Alle Maßnahmen des Bauwerks selbst wie die Errichtung oder Instandsetzungsmaßnahmen werden vollständig in den Ebene 1-Untersuchungen berücksichtigt. Auf der Ebene 2 werden die Auswirkungen resultierend aus Maßnahmen auf der Ebene 1 erfasst, beispielsweise wenn aufgrund der Erneuerung von Brückenkappen eine Sperrung von Fahrspuren erfolgen muss. Ebene 3 wird konzeptionell in die Analysen einbezogen, indem bei dem Auftreten von Verkehrsstaus ab einer definierten Staulänge davon ausgegangen wird, dass Umfahrungen gewählt werden, diese werden allerdings nur abgeschätzt und nicht detailliert simuliert, siehe Anhang E.2.2.3. Insgesamt stehen damit einmal die Lebenszyklusanalysen auf Ebene 1 und zum anderen die Wechselwirkungen zwischen Ebene 1 und Ebene 2 im Vordergrund. Mögliche Netzeffekte werden miteinbezogen, es erfolgt aber keine vollständige Analyse auf der Netzebene. Die entstehenden Effekte auf Ebene 2 werden vornehmlich mit der Methode der externen Kostenrechnung analysiert, in die im nachfolgenden Kapitel 3 eingeführt wird.

Die Darstellungen in den vorangegangenen Abschnitten zeigen, dass Konzepte im Nachhaltigkeitsbereich grob in normative Handlungsempfehlungen bzw. -anweisungen und in wissenschaftlich-analytische Untersuchungen unterteilt werden können. Diese zwei Gruppen werden auch in LITTIG und GRIESSLER (2004) diskutiert. Die im Folgenden durchzuführenden Analysen ordnen sich klar in den analytischen Bereich ein. Insgesamt ist der Untersuchungsrahmen darauf ausgerichtet, Benchmarks für Politiker, Bauherren und Planer zu generieren und Möglichkeiten sowie Grenzen der zu verwendenden Methoden im Rahmen der Nachhaltigkeitsanalyse aufzuzeigen. Außerdem sollen Empfehlungen

für Entscheider abgeleitet werden, die an der Gestaltung von Indikatoren und Indikatorensystemen beteiligt sind. Als Ergebnis kann dann ein normativer, auf die festgelegten Schutzziele abgestimmter Bewertungsrahmen definiert werden.

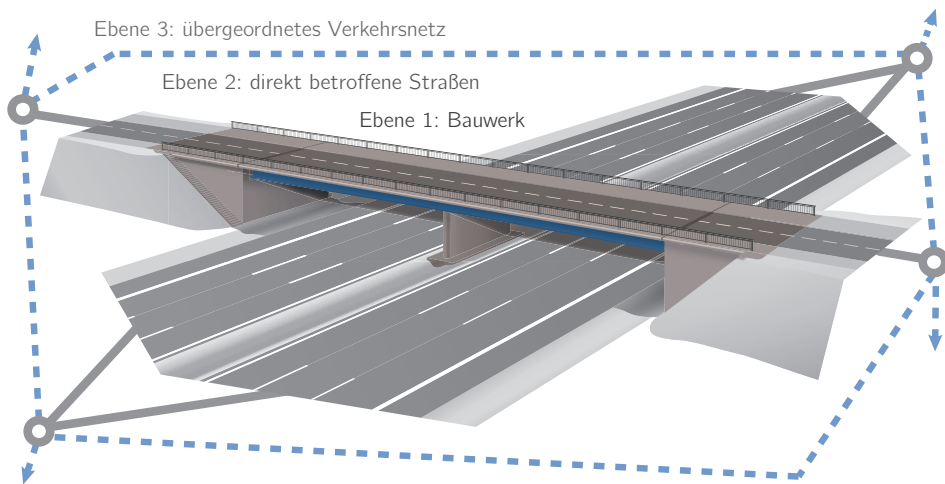


Abbildung 2.11: Einbettung des Brückenbauwerks in seine Umgebung und sich daraus ergebende Ebenen, die in eine Bewertung einfließen können






### 2.4.2 Abgrenzung

Der vorgestellte Untersuchungsrahmen weist Überschneidungen mit Ansätzen auf, die als Managementsysteme bzw. Lebensdauermanagement bezeichnet werden. Hierbei steht die Bewirtschaftung von Infrastrukturbauwerken in der Nutzungsphase im Vordergrund. Es haben sich verschiedene Vorhersagesysteme entwickelt, die sich in den Aspekten Anwender, Betrachtungszeitraum und Analyseziel unterscheiden und die in Tabelle 2.3 mit einer Nachhaltigkeitsbewertung verglichen werden. Da oftmals ähnliche Methoden wie in Nachhaltigkeitsuntersuchungen verwendet werden, findet an dieser Stelle eine Abgrenzung statt.

Das deutsche Bauwerks-Management-System (BMS) ist von der BASt entwickelt worden und wird u. a. als Controlling-Instrument vornehmlich für Brücken eingesetzt, bezieht aber auch Tunnel, Stützbauwerke und Lärmschutzeinrichtungen mit ein. Die Systemanwendung findet sowohl auf Objekt- als auch auf Netzebene statt und verwendet Schädigungsmodelle und empirisch ermittelte Nutzungsdaueransätze zur Strategieerstellung

(HAARDT 2003). Auf Netzebene kann eine Budgetplanung durch jährliche Koordination einzelner Instandhaltungsmaßnahmen erfolgen und es stehen dabei die direkten Bauwerkskosten im Vordergrund (HOLST 2006). Im Bereich der Straße ist in Deutschland ein eigenes Pavement-Management-System (PMS) entwickelt worden, das in methodischer Hinsicht dem BMS sehr ähnlich ist (OEFNER et al. 2004). Bauwerks-Management-Systeme haben vor allem mit dem Anwendungsfall Brücken weltweit eine sehr große Verbreitung (ADEY et al. 2012). Als privatwirtschaftliches Pendant kann das Asset-Management bezeichnet werden, das im Infrastrukturbereich beispielsweise im Rahmen von Public-Private-Partnership-Projekten eingesetzt wird. Hier steht i. d. R. nicht die Netzebene, sondern ein Streckenzug mit seinen Einzelbauwerken im Analysefokus. Da es sich um proprietäre Ansätze handelt, gibt es eine große Anzahl an verschiedenen Asset-Management-Systemen, siehe beispielsweise VEIT-EGERER et al. (2013).

Tabelle 2.3: Gegenüberstellung von Eigenschaften einer Nachhaltigkeitsbewertung, verschiedener Managementsysteme und einer Lebensdauervorhersage

Bezeichnung	Betrachtungsgegenstand	Betrachtungszeitraum [a]	Betrachtungsebene	Anwender	Ziel
Nachhaltigkeitsbewertung	Ökonomie, Ökologie, Soziales		Objektebene	Planer, Consultants	Variantenvergleich
Bauwerks-Management-System	bauwerksbezogene Kosten, tlw. Verkehrseffekte		Netzebene und Objektebene	BASt, Behörden	Qualitäts- und Finanzierungsplanung für Bund und Länder
Asset-Management-System	bauwerksbezogene Kosten, tlw. Verkehrseffekte		Streckenzug und Objektebene	Consultants	Erhaltungsplanung
Lebensdauervorhersage	Bauwerks-Zustandsindex		Objekt- und Bauteilebene	Consultants, Forschungsinstitute	Bestimmung von Ausfallwahrscheinlichkeiten
Baustellenmanagement	Verkehrseffekte		Maßnahmenebene	Behörden, vor allem auf Landesebene	Baustellenabwicklung

Beide Arten von Managementansätzen verwenden Lebensdauervorhersagen und -modelle zur Abbildung des zeitabhängigen Zustandes von Bauwerken und Bauteilen. Die Entwicklung solcher Modelle ist oftmals Gegenstand von Forschungsvorhaben (LANDOLFO und VESIKARI 2011; SCHIESSL und MAYER 2009) und teilweise auch normativ erfasst (ISO 13823: 2008; ISO 15686-2: 2008). Baustellenmanagementansätze hingegen zielen auf die Reduzierung von Verkehrsbehinderungen ab und bauen auf Verkehrsanalysemodellen auf. Dabei wird sowohl die individuelle Baustellenauslegung als auch die aufeinander abgestimmte Baustellenplanung im Netz adressiert (KIRSCHFINK und RIEGELHUTH 2003).

Im Gegensatz zu den dargestellten Ansätzen integriert eine Nachhaltigkeitsanalyse verschiedene Betrachtungsgegenstände und hat einen Variantenvergleich zur Entscheidungsunterstützung zum Ziel. Zum Abbilden des Lebenszyklus muss auch bei Nachhaltigkeitsanalysen eine Verwendung von Referenz-Nutzungsdauern stattfinden, allerdings kann aufgrund des langen Analysehorizonts von 100 Jahren i. d. R. keine Anwendung von Schädigungsmodellen erfolgen. Daher wird auf die Definition von Szenarien zurückgegriffen, auf die näher in Abschnitt 4.1.2 eingegangen wird. Nachhaltigkeitsanalysen zielen außerdem primär auf die Bauphase von Neubauten oder größeren Instandsetzungsmaßnahmen ab. Insgesamt zeigt sich, dass eine Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturen eine Ergänzung bestehender Managementansätze darstellt und durch das deutlich unterschiedliche Analyseziel einer eigenständigen Systemgestaltung bedarf.

### 2.4.3 Exkurs: Resilienz

In Nachhaltigkeitsanalysen werden alle Auswirkungen integriert, die planmäßig während des Lebenszyklus von Bauwerken auftreten. Dabei werden beispielsweise alle in Szenarien erfassten Instandhaltungsmaßnahmen sowie der Rückbau berücksichtigt. Unplanmäßige Auswirkungen werden hingegen, wie in Abbildung 2.12 dargestellt, nicht einbezogen.

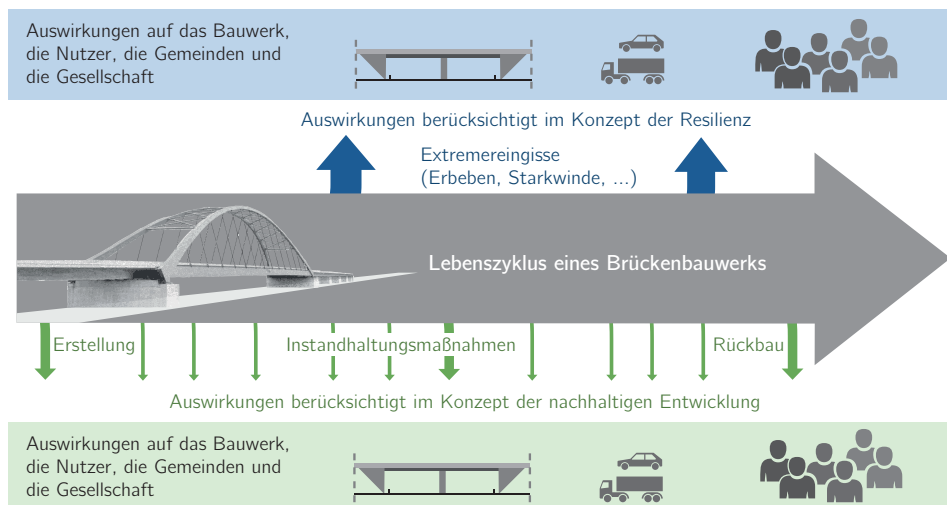


Abbildung 2.12: Vergleich der beiden Konzepte der nachhaltigen Entwicklung und der Resilienz (Zinke und Ummerhofer 2014)

Auswirkungen von Ereignissen, deren Eintrittszeitpunkt nicht exakt bestimmbar ist, können allerdings in Resilienzanalysen erfasst werden, wobei die Resilienz von Bauwerken sich aus den zwei Aspekten der Widerstandsfähigkeit gegen ein Extremereignis und der Wiederherstellungsgeschwindigkeit einer definierten Bauwerksfunktionalität nach einem Schadenseintritt zusammensetzt (BRUNEAU et al. 2003). Wie erkennbar werden damit Folgen von Extremereignissen erfasst und bewertet, dies sind z. B. Erdbeben, Starkwinde, aber auch Ereignisse wie Fahrzeuganprall. Das Konzept der Resilienz betrachtet dabei nicht nur die Leistungsfähigkeit des Bauwerks selbst, sondern bezieht auch Effekte auf Nutzer und die Gesellschaft im gesamten Lebenszyklus mit ein. Hier ist eine deutliche Ähnlichkeit zum methodischen Vorgehen im Rahmen von Infrastruktur-Nachhaltigkeitsanalysen zu erkennen.

In BOCCHINI et al. (2014) wird gezeigt, dass beide Konzepte der nachhaltigen Entwicklung und der Resilienz bezüglich der eingesetzten Analysemethoden, der zu untersuchenden Dimensionen und des Untersuchungsrahmens viele Ähnlichkeiten aufweisen. Dort wird auch ein risikobasierter Ansatz für eine Kombination der beiden Konzepte entwickelt, bei dem die Höhe der Auswirkungen mit ihren jeweiligen Eintretenswahrscheinlichkeiten multipliziert werden. Bei Resilienzanalysen ist dabei mit sehr hohen Auswirkungen und gleichzeitig geringen Eintretenswahrscheinlichkeiten zu rechnen, die Auswirkungen bei Nachhaltigkeitsuntersuchungen sind deutlich kleiner, besitzen aber eine sehr hohe Eintretenswahrscheinlichkeit.

Resilienzanalysen können als eine Erweiterung von Nachhaltigkeitsanalysen verwendet werden, wenn Auswirkungen von Extremereignissen mit erfasst werden sollen. Dieser Forschungsansatz stellt allerdings ein eigenes Themenfeld dar und erfordert zunächst die Weiterentwicklung von Ansätzen zur Brücken-Nachhaltigkeitsbewertung, damit diese den in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Anforderungen innerhalb des definierten Untersuchungsrahmens gerecht werden. Resilienzanalysen werden daher im Folgenden nicht weiter in die Betrachtungen einbezogen.



## **3 Externe Effekte**

Die Einführung in die Nachhaltigkeitsbewertung von Infrastrukturbauwerken in Kapitel 2 wird maßgebend von der Sichtweise des konstruktiven Ingenieurbaus bestimmt. Aus Sicht der Volkswirtschaftslehre und im Bereich der Verkehrswissenschaften spielt die Quantifizierung von Auswirkungen auf Nutzer, Anwohner und die Öffentlichkeit eine wichtige Rolle und diese wird standardmäßig mit dem Begriff der externen Effekte umschrieben. Die in diesem Bereich entwickelten Methoden lassen sich sehr gut in den definierten Untersuchungsrahmen für die Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken integrieren, weshalb im Folgenden näher auf externe Effekte eingegangen wird.

Die Kenntnis der Definitionen und der Ermittlungsverfahren von externen Effekten und externen Kosten ist wichtig, um die den verschiedenen Studien zu Grunde liegenden Methoden bewerten und damit die Aussagekraft der angegebenen Monetarisierungsansätze beurteilen zu können. Ohne dieses Hintergrundwissen können Bandbreiten der Bewertungsansätze nicht interpretiert werden und es besteht damit die Gefahr einer unreflektierten Verwendung von Eingangswerten. Außerdem ist die genaue Dokumentation der verwendeten Ansätze eine notwendige Maßnahme, um der in der Methodenkonvention vom Umweltbundesamt (UBA) geforderten Transparenz der Berechnung nachzukommen (UBA 2007). Im Folgenden wird daher zunächst grundlegend auf das Themengebiet der externen Effekte eingegangen, danach erfolgt die Beschreibung der Anwendung in dieser Arbeit und abschließend werden die zu verwendenden Monetarisierungsansätze abgeleitet.

### **3.1 Theoretische Grundlagen**

#### **3.1.1 Externe Effekte und externe Kosten**

Der Begriff der externen Effekte bzw. Externalitäten stammt aus der Wohlfahrtsökonomie und beschreibt den Sachverhalt, dass die Handlungen eines Wirtschaftssubjekts andere Personen oder Personengruppen positiv oder negativ beeinflussen, ohne dass für diese

Beeinflussung ein Preis bezahlt wird (SCHMID 2005). Ein Beispiel hierfür ist die Benutzung von Fahrzeugen, die Schadstoffemissionen zur Folge hat und damit Anwohner und einen Teil der Bevölkerung dem negativen Effekt der Luftverschmutzung aussetzt. Ein Teil der aus dem Transport resultierenden Effekte wird also nicht vom Verursacher getragen, sondern von Dritten, ohne dass diese hierfür entschädigt werden. Der beschriebene Zusammenhang stellt dabei genauso wie die meisten im Verkehrsbereich existenten Effekte einen negativen externen Effekt dar. Weitere wichtige externe Effekte des Verkehrs sind Lärm, Staus, emissionsbedingte Einflüsse auf die Klimaerwärmung, Unfälle und Trennwirkungen von Straßen (BICKEL 2005).

Erfolgt eine Bewertung des jeweiligen externen Effekts in Geldeinheiten, wird dieser in externe Kosten umgerechnet. Dieser Schritt wird Monetarisierung genannt. Die zu verwendenden Monetarisierungsansätze werden je nach zu bewertendem Effekt unterschiedlich ermittelt (siehe Abschnitt 3.1.4) und weisen teilweise erhebliche Unsicherheiten auf (SPADARO und RABL 2008). Die Umrechnung in Geldeinheiten hat allerdings den Vorteil, dass verschiedene Wirkungen miteinander verglichen werden können und ein Bewertungsmaßstab in Bezug auf die jeweiligen Baukosten von Maßnahmen geschaffen werden kann. Dies ermöglicht eine umweltpolitische Debatte und schafft einheitliche Grundlagen für Entscheidungsträger (UBA 2007).

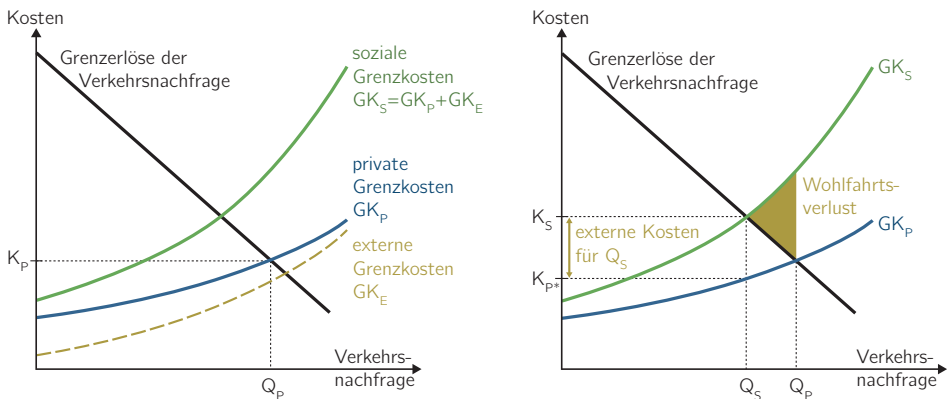


Abbildung 3.1: Private und soziale Grenzkosten, Marktgleichgewicht bei ausschließlicher Berücksichtigung privater Grenzkosten (links) und Marktgleichgewicht bei Ansatz von sozialen Grenzkosten (rechts), aufbauend auf Verhoef et al. (1996)

Die volkswirtschaftlich begründete Erklärung von externen Kosten kann auf verschiedenen Wegen erfolgen, hier wird eine verkehrsspezifische Darstellung der Grenznutzen

der Verkehrsnachfrage gegenüber den privaten und sozialen Grenzkosten gewählt, siehe Abbildung 3.1. Der Begriff der Grenzkosten wird in Abschnitt 3.1.5 definiert. Eine private Grenzkostenfunktion  $GK_p$  beinhaltet alle Kostenkomponenten, die ein Verkehrsteilnehmer zu tragen hat, wie Anschaffungs-, Abnutzungs- und Benzinkosten. Die Grenzkostenfunktion ist dabei exponentiell steigend, da bei zunehmender Verkehrsnachfrage die gegenseitigen Fahrzeugbeeinflussungen zunehmen. Werden nur private Grenzkosten berücksichtigt, ergibt sich im Gleichgewichtszustand eine Verkehrsnachfrage  $Q_p$ . Dieses Gleichgewicht berücksichtigt allerdings keine externen Grenzkosten  $GK_E$ , wie beispielsweise externe Kosten entstehend aus Schadstoffemissionen des Fahrzeugbetriebs. Werden private und externe Grenzkosten addiert, ergeben sich die sozialen Grenzkosten  $GK_S$ , die alle Auswirkungen des Fahrzeugbetriebs auf die Gesellschaft abbilden und teilweise auch als volkswirtschaftliche Grenzkosten bezeichnet werden. Durch den veränderten Verlauf der sozialen Grenzkostenfunktion stellt sich auch ein verändertes Gleichgewicht bei einer Verkehrsnachfrage  $Q_S$  ein, bei dem von einer für die Gesellschaft effizienten Allokation gesprochen wird. Der Unterschied der sich bei dieser Verkehrsstärke ergebenden privaten Kosten  $K_{p^*}$  und sozialen Kosten  $K_S$  sind die externen Kosten für die spezifische Verkehrsnachfrage  $Q_S$ . Werden externe Kosten in die Entscheidungsfindung mit eingebunden, kann ein Wohlfahrtsverlust vermieden werden.

Die externen Kosten quantifizieren damit die Differenz, die sich aus dem Delta einer gesamtwirtschaftlichen und einer betriebswirtschaftlichen Analyse ergibt. Wenn externe Kosten auf den Verursacher übertragen werden sollen, wird von einer Internalisierung externer Effekte gesprochen. Dies kann beispielsweise durch die Erhebung von Steuern für die Benutzung von Straßen (Maut, Vignetten etc.) oder die Besteuerung von Kraftstoffen geschehen (ROUWENDAL und VERHOEF 2006). Die Internalisierung von externen Verkehrseffekten steht regelmäßig auf der politischen Agenda und wird auf europäischer Ebene in ihren Grundsätzen geregelt (EP 2006).

### 3.1.2 Historischer Abriss

Die theoretischen Grundlagen zur Beschreibung von externen Effekten sind mittlerweile fast 100 Jahre alt und gehen auf Pigou zurück, der das Themengebiet 1920 das erste Mal beschreibt. Pigou erkannte, dass sich bei Integration gesellschaftlicher Auswirkungen ein gegenüber einer rein privatwirtschaftlichen Optimierung verändertes Gleichgewicht ergibt und nur bei der Berücksichtigung von externen Effekten ein pareto-effizientes Gleichgewicht gewährleistet wird (PIGOU 1920). Das von ihm vorgeschlagene Instrument zur

Internalisierung der durch einzelne Wirtschaftsbeteiligte entstehenden externen Kosten wird als Pigou-Steuer bezeichnet.

Erste Arbeiten im Verkehrssektor sind in den 1960er Jahren zu verzeichnen (ROUWENDAL und VERHOEF 2006), allerdings beschleunigte sich vor allem die politische Diskussion erst in den 1990er Jahren (BAUM et al. 1998), wozu auch das Grünbuch „Towards Fair and Efficient Pricing in Transport“ (EC 1995b) beitrug. Mit Beginn der 2000er Jahre fand auf europäischer Ebene die Erstellung einer Reihe an Studien statt, die länder- bzw. trassen-spezifische Durchschnitts- und Grenzkosten ermittelten. Die wichtigsten existierenden Ansätze werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

#### 3.1.3 Bestehende Untersuchungsansätze

Vor allem im Energie- und Verkehrssektor nimmt die Untersuchung von externen Effekten einen wichtigen Stellenwert ein, da in diesen beiden Bereichen gesellschaftlich relevante Größenordnungen von externen Kosten entstehen (MAIBACH et al. 1996). Im Folgenden findet eine Konzentration auf Ansätze aus dem Verkehrsbereich statt. Die heutzutage existierenden Untersuchungen und Studien lassen sich grob in drei Kategorien einteilen (ZINKE et al. 2012a):

- *Spezifische Untersuchungen*: Diese Veröffentlichungen oder Forschungsprojekte beinhalten die detaillierte Untersuchung eines oder mehrerer externer Effekte und Methoden zur Überführung dieser in Geldeinheiten. Die Methoden finden Verwendung in den verkehrsspezifischen Untersuchungen des nächsten Punktes.
- *Verkehrsträgerspezifische Studien zu externen Verkehrskosten*: Hier werden externe Effekte des Verkehrs für verschiedene Verkehrsträger (Straße, Schiene, Luft, Wasser) untersucht. Die einzelnen Studien unterscheiden sich hinsichtlich der integrierten externen Effekte, der Berechnungsmethoden, der Systemgrenzen und der untersuchten Regionen. Die wichtigsten europäischen Studien sind CAFE (2005), COMPETE (2006), GRACE (2005), HEATCO (2006), INFRAS/IIW (2000) und UNITE (2003).
- *Metastudien*: Diese Studien haben das Ziel, einen Konsens in der Schätzung von externen Kosten herbeizuführen und die methodischen Grundlagen der Berechnung zu verbessern. Dafür werden verschiedene Studien verglichen, Systemgrenzen und Bewertungsansätze vereinheitlicht und Empfehlungen für die Verwendung von Monetarisierungsansätzen gegeben. International ist die Studie „External Costs of

Transport in Europe“ hervorzuheben (MAIBACH et al. 2008), die mittlerweile zwei Mal aktualisiert wurde (ESSEN et al. 2011; EC 2014). Auf nationaler Ebene kann die Methodenkonvention des Umweltbundesamtes als deutsche Metastudie charakterisiert werden (Erstversion UBA (2007), Aktualisierung UBA (2012)).

In den letzten Jahren ist eine zunehmende Vernetzung der Studien untereinander und ein gegenseitiger Abgleich von Daten und verwendeten Methoden zu beobachten. Auffällig ist, dass in Deutschland und Europa nur ein relativ kleiner Kreis an Wissenschaftlern an der Erstellung der nationalen und internationalen Studien zu externen Verkehrskosten beteiligt ist. Daher ist davon auszugehen, dass vor allem die später entstandenen Studien stark auf den Ergebnissen vorhergehender Studien aufbauen. Vor allem die Metastudien stellen eine interessante Entwicklung dar, verschiedene Ansätze zusammenzuführen und einheitliche Bewertungsgrundlagen zu schaffen. Daher wird bei der Definition von in dieser Arbeit zu verwendenden Monetarisierungsansätzen ein Schwerpunkt auf die Metastudien gelegt, die gleichzeitig auch die aktuellsten Ergebnisse beinhalten.

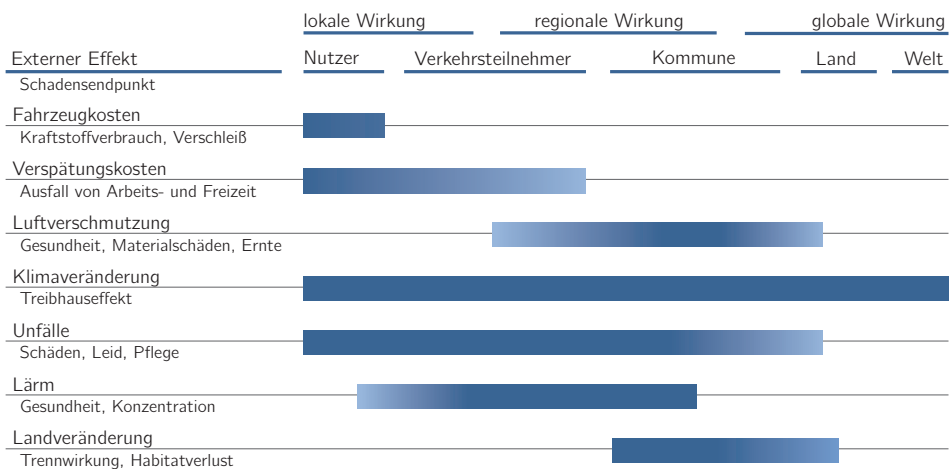


Abbildung 3.2: Externe Effekte des Verkehrs mit ihren jeweiligen Schadensendpunkten und der zugehörigen räumlichen Wirkung (Zinke et al. 2012a)

In den bestehenden Untersuchungsansätzen werden jeweils leicht unterschiedliche externe Effekte untersucht, im Verkehrsbereich sind die maßgebenden externen Effekte aber bekannt. In Abbildung 3.2 sind diese externen Effekte mit ihren jeweiligen Schadensendpunkten genannt, die Eingang in eine Nachhaltigkeitsanalyse finden können. Die räumliche Wirkung zeigt dabei, dass unterschiedliche betroffene Gruppen existieren. Je nach

räumlichem Wirkungsbereich müssen zudem verschiedene Kostenkomponenten in die Berechnung miteinbezogen werden. Als Beispiel kann der Schadstoffausstoß von Fahrzeugen genannt werden, der zu einer Luftverschmutzung führt und somit eine regionale Auswirkung auf Ernteerträge und die Gesundheit von Anwohnern haben kann. Gleichzeitig kann ein Schadstoffausstoß zur Klimaerwärmung beitragen, der eine globale Auswirkung hat. Für verschiedene externe Effekte müssen daher unterschiedliche Berechnungsmethoden verwendet werden.

### 3.1.4 Erhebungsverfahren

Zur Bewertung der durch externe Effekte entstehenden Schadensendpunkte in Geldeinheiten wird eine Berechnung von externen Kosten durchgeführt, indem eine Monetarisierung erfolgt. Die Wertansätze für die Monetarisierung müssen bestimmt werden, beispielsweise indem Schäden wie Ernteauffälle bewertet oder Präferenzen zur Vermeidung von Schadstoffen erhoben werden. In der Literatur existiert derzeit kein einheitliches Gliederungsschema zur Systematisierung der verschiedenen Erhebungsmethoden.

#### Marktpreise

Wertschöpfungsmethode	Schadensverringerungskosten	Kompensationskosten
Bewertung von Ertragsverlusten <i>Bsp.: Kosten von erlittenen Ernteauffällen</i>	Kosten zur Verringerung eines Schadens <i>Bsp.: Einbau von Lärmschutzfenstern zur Verminderung der Schallpegels</i>	Ersatzmaßnahme zur Wiederherstellung der Funktion einer natürlichen Ressource <i>Bsp.: Kosten für Versickerungsmaßnahmen bei Versiegelung von Flächen</i>

#### Indirekte Bewertungsverfahren

Hedonistische Bewertung	Aufwands- und Reisekostenmethode
Bewertung des Güterwertes in Abhängigkeit der Umweltqualität <i>Bsp.: Immobilienwert eines Wohnhauses in der Nähe einer Autobahn im Vergleich zu einer ruhigen Lage</i>	Bewertung des Erholungsnutzens von Naturlandschaften <i>Bsp.: Bereitschaft zur Zahlung von Reise- und Liftkosten für den Besuch in einem Skigebiet</i>

#### Direkte Bewertungsverfahren

Contingent Valuation	Attributbasierte Bewertung	Partizipative Bewertung
Zahlungsbereitschaft für bestimmte Umweltqualitäten <i>Bsp.: Preis, den eine Person für bessere Luftqualität zu zahlen bereit ist</i>	Zahlungsbereitschaft für mehrdimensionale Landschaftsattribute <i>Bsp.: Bestimmung der Attribute einer Landschaft, die eine Person am meisten wertschätzt</i>	Gruppendiskussionen mit abschließender Bewertung eines Umweltguts <i>Bsp.: Festlegung des Werts einer ruhigen Umgebung nach ausführlicher Diskussion</i>

Abbildung 3.3: Methoden zur Bestimmung von Monetarisierungsansätzen, aufbauend auf UBA (2007)

Abbildung 3.3 orientiert sich an der Systematisierung, die in UBA (2007) verwendet wird. Dort werden drei Hauptgruppen generiert, um unterschiedliche Erhebungsverfahren zu

klassifizieren. Eine Bewertung mit Marktpreisen nutzt dabei am Markt gehandelte Güter, um Schäden, deren Kompensationsmaßnahmen oder vorbeugende Maßnahmen direkt zu bewerten. Indirekte Bewertungsverfahren bauen auf der Beobachtung von am Markt gehandelten Gütern auf und leiten daraus den Wert eines nicht am Markt gehandelten Umweltgutes ab. Direkte Bewertungsverfahren nutzen die Befragung von Individuen zur Ermittlung ihrer Zahlungsbereitschaften. Alle Bewertungsmethoden werden in UBA (2007) detailliert erläutert, weshalb hier keine Erklärung der einzelnen Methoden erfolgt.

### 3.1.5 Gesamt-, Durchschnitts- und Grenzkosten

In den im Abschnitt 3.1.3 vorgestellten Studien werden verschiedene Arten von Kosten berechnet. *Gesamtkosten* charakterisieren dabei für einen festgelegten Zeitraum und ein definiertes Gebiet (Deutschland, Europa etc.) die Gesamthöhe der entstehenden externen Kosten. Hierdurch kann vor allem gezeigt werden, welche Bedeutung externe Kosten für eine Volkswirtschaft haben und welche Rolle einzelne Kostenkategorien dabei spielen, für Deutschland siehe beispielsweise INFRAS/IW (2007). Gleichzeitig kann durch zeitliche Analysen untersucht werden, wie sich die Gesamthöhe über Zeiträume hinweg verändert. Die Ermittlung erfolgt i. d. R. mit Hilfe von Top-Down-Ansätzen, die makroökonomische Zusammenhänge modellieren und dann die entstehenden Auswirkungen quantifizieren (UBA 2007).

Auch *Durchschnittskosten* lassen sich mit Top-Down-Ansätzen berechnen, hier werden die innerhalb der festgelegten Systemgrenzen berechneten Kosten auf eine Referenzeinheit bezogen. Als Bezugsmaßstab können beispielsweise gefahrene Fahrzeugkilometer verwendet werden. Dabei ist zu beachten, dass z. B. deutsche Durchschnittswerte keine Aussage über regionale Unterschiede zulassen, hierzu werden Grenzkosten benötigt.

*Grenzkosten* sind definiert als die zusätzlichen Kosten (Wirkung) bei Änderung der Ausbringungsmenge um eine Einheit (Ursache), siehe BARTLING und LUZIUS (2008). In Bezug auf den Straßenverkehr ist eine zusätzliche Einheit beispielsweise ein zusätzliches Fahrzeug, aber auch der Bezug auf Fahrzeugkilometer oder Passagierkilometer ist möglich. Da die gegenseitige Fahrzeugbeeinflussung bei zunehmender Verkehrsnachfrage ansteigt und bei Straßen eine Grenzkapazität existiert, sind die privaten und externen Grenzkosten des Straßenverkehrs exponentiell ansteigend (siehe auch Abbildung 3.1). Daher ist ausschlaggebend, in welchem Punkt bzw. bei welcher Verkehrsnachfrage die Grenzkosten bestimmt werden. Liegen lineare Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge vor, dann entsprechen die Grenzkosten den variablen Durchschnittskosten (UBA 2007).

Grenzkosten sind länderspezifisch und regionenabhängig. Dies kann an der Kategorie der Staukosten veranschaulicht werden. In Ländern wie Deutschland mit oft auftretenden Kapazitätsproblemen entstehen sehr viel häufiger Verkehrsstaus als z. B. in den skandinavischen Ländern. Die externen Grenzkosten sind damit in Deutschland sehr viel höher anzusetzen (MAIBACH et al. 2008). Gleichzeitig ergeben sich natürlich auch innerhalb Deutschlands verschiedene Grenzkostenansätze für verschiedene Trassen in Abhängigkeit ihrer Kapazität und Belastung. Die Bestimmung von Grenzkosten kann nur mit einem Bottom-Up-Ansatz erfolgen. Für Luftschadstoffe wurde beispielsweise in dem Projekt „ExternE“ die Methode des Wirkungspfadansatzes entwickelt (EC 1995a), mit der Wirkungen von Luftschadstoffen auf Schadensendpunkte (menschliche Gesundheit, Ernteausfälle, Schäden an Gebäuden etc.) bestimmt und monetarisiert werden. Eine Erläuterung des Wirkungspfadansatzes findet in Abschnitt 3.2.3 statt.

## 3.2 Methodische Anwendung

### 3.2.1 Elemente externer Kosten

In ROTHENGATTER (1996) wird hervorgehoben, dass im Rahmen von Untersuchungen zu externen Effekten definiert werden muss, welche Effekte als extern bzw. intern angesehen werden. In der vorliegenden Arbeit erfolgt ausschließlich eine Untersuchung und Bewertung der durch Baumaßnahmen induzierten externen Effekte. Baumaßnahmen führen dabei wie in Abbildung 3.4 dargestellt zu unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen der Fahrzeuge im Annäherungs-, Verschwenkungs- und Baustellenbereich. Externe Effekte des Verkehrs im Normalbetrieb des Bauwerks werden nicht mit einbezogen. Die Fokussierung auf die Wechselwirkung zwischen Baumaßnahmen an Brücken und die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf den Verkehr stellt einen deutlichen Unterschied zu klassischen Untersuchungen im Bereich der Analyse von externen Kosten des Straßenverkehrs dar, in denen i. d. R. die Auswirkungen der regulären Nutzung analysiert werden.

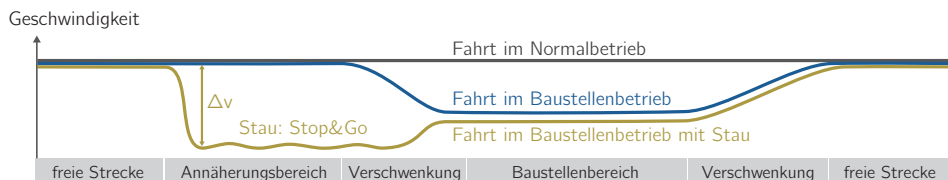


Abbildung 3.4: Mögliche Geschwindigkeitsprofile von Fahrzeugen im Normal- und Baustellenbetrieb



Die in den Untersuchungen zu berücksichtigenden Effekte sind in Abbildung 3.5 auf Grundlage der verschiedenen Grenzkostenfunktionen ausgewiesen. Die durchgezogenen Linien der Grenzkostenfunktionen  $GK_E$ ,  $GK_P$  und  $GK_S$  bezeichnen dabei die Situation im Normalbetrieb ohne Einfluss von Baumaßnahmen. Wenn durch Baustellen die Grenzkapazität von Straßen reduziert und eine Geschwindigkeitsbegrenzung eingeführt wird, steigen die privaten Grenzkosten  $GK_{P,B}$ , da Zeitverluste entstehen und es zu höheren Fahrzeugbetriebskosten kommt. Gleichzeitig können auch die externen Grenzkosten im Baustellenbetrieb  $GK_{E,B}$  steigen, wenn beispielsweise durch Stop-and-go-Fahrweise im Stau höhere Schadstoffausstöße entstehen. Es kann aber auch der Fall eintreten, dass externe Grenzkosten im Baustellenbetrieb geringer sind als im Normalbetrieb. Diese Situation wird beispielsweise durch eine effizientere Verbrennungsarbeit von Motoren bei einer Geschwindigkeit von 80 km/h im Baustellenbereich gegenüber einer deutlich schnelleren Geschwindigkeit auf freier Strecke erzeugt. Hier führt also die Geschwindigkeitsbegrenzung zu einer Verringerung des Schadstoffausstoßes und damit zu einer Reduzierung der externen Grenzkosten  $GK_{E,B}$ . Ob eine Steigerung oder Reduzierung externer Grenzkosten stattfindet, hängt maßgebend von der Länge der Baustelle und der notwendigen Beschleunigungsarbeit am Baustellenende sowie der jeweiligen Verkehrsnachfrage ab.

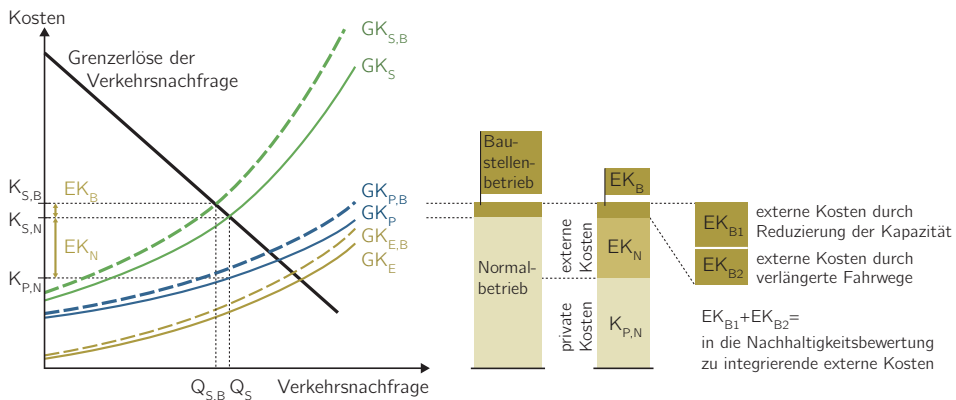


Abbildung 3.5: Ableitung und Visualisierung der durch Baustellen verursachten externen Kostenkomponenten

Aus Addition der privaten und externen Grenzkosten im Baustellenbetrieb lassen sich die sozialen Grenzkosten im Baustellenbetrieb  $GK_{S,B}$  berechnen. Durch den Vergleich mit den sozialen Grenzkosten im Normalbetrieb  $GK_S$  kann dann der durch die Baumaßnahmen induzierte Kostenblock  $EK_B$  bestimmt werden. Diese durch Brückenbaustellen verursachten externen Kosten stehen im Fokus der Untersuchungen. Im rechten Teil der

Abbildung 3.5 ist zu erkennen, dass dabei Kosten des Normalbetriebs ( $EK_N$  und  $K_{P,N}$ ) ausgeklammert werden.

Gleichzeitig wird deutlich, dass die durch Baustellen verursachten externen Kosten auch Kostenkomponenten beinhalten, die in vielen Studien als Nutzerkosten (Zeitverluste, Kosten infolge von höherem Benzinverbrauch und Abnutzung) bezeichnet werden. In dieser Arbeit wird als Verursacher der Wirkungen die jeweilige Brückenbaumaßnahme angesehen, daher werden sowohl die Verkehrsteilnehmer als auch weitere Betroffene als extern und alle Maßnahmen an der Brücke selber als intern definiert. Im Weiteren wird deshalb unter dem Begriff „externe Kosten“ nur der durch Baumaßnahmen verursachte Kostenblock  $EK_B$  verstanden. Es wird ausdrücklich betont, dass diese für eine Nachhaltigkeitsanalyse von Brücken passende Definition *nicht* im Einklang mit der Definition der meisten volkswirtschaftlich orientierten Studien zu externen Effekten steht.

Vor allem bei Autobahnen überführenden Brücken können zwei Arten von unterschiedlich zu berechnenden externen Kosten differenziert werden. Die externen Kosten  $EK_{B1}$  resultieren aus einer Reduzierung der Straßenkapazität durch Baumaßnahmen und führen zu gegenüber dem Normalbetrieb veränderten Geschwindigkeitsprofilen und damit zu veränderten Fahrzeiten, Schadstoffausstößen, Unfallrisiken etc. Wenn eine Sperrung von Straßen stattfindet, was beispielsweise bei der Erneuerung der Asphaltdeckschicht der oben liegenden Straße eintritt, dann müssen Verkehrsteilnehmer Alternativrouten bzw. Umleitungen wählen, die i. d. R. zu längeren Fahrwegen führen. Die daraus entstehenden externen Kosten  $EK_{B2}$  sind anders zu berechnen als kapazitätsbedingte externe Kosten. Die Erläuterung der Berechnungsansätze findet sich in Abschnitt 5.1.

#### 3.2.2 Abgrenzung zur Kosten-Nutzen-Analyse

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist wie in Abschnitt 2.4.1 beschrieben ein Instrument in der Vorplanung zur Trassenbestimmung und zum Vergleich von verschiedenen Linienführungen. Teilweise wird sie auch als Nutzen-Kosten-Analyse bezeichnet. In Deutschland ist nach Bundeshaushaltsordnung die gesamtwirtschaftliche Rentabilität von Verkehrsprojekten zu berechnen und nur Projekte mit einem Nutzen-Kosten-Verhältnis größer als eins dürfen finanziert werden (BMVBS 2013a).

Zur Berechnung des Nutzens eines Verkehrsprojekts wird der bei Durchführung des Projekts gegenüber dem Ausgangszustand zusätzlich geschaffene gesamtwirtschaftliche Nutzen für einen Bewertungszeitraum von 20 bis 30 Jahren berechnet. Daraus ist ersicht-

lich, dass vor allem der Normalbetrieb bewertet wird. Im Gegensatz dazu werden für die Berechnung von externen Effekten im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen die Auswirkungen des Normalbetriebs nicht in die Berechnungen integriert und durch Fokussierung auf die Phase der Entwurfs- und Genehmigungsplanung wird angenommen, dass die Trassenführung schon festgelegt und damit die Bauaufgabe definiert ist. Es zeigt sich, dass eine Kosten-Nutzen-Analyse damit eine abweichende Zielsetzung besitzt und methodische Ansatzpunkte nur bedingt im Rahmen der Berechnung von externen Kosten für eine Nachhaltigkeitsanalyse verwendet werden können.

### 3.2.3 Externe Kosten und Ökobilanzierung

Um externe Effekte, die durch Luftschadstoffe verursacht werden, in Nachhaltigkeitsanalysen zu integrieren, gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten: die Umrechnung in externe Kosten oder die Ausweisung in einer Ökobilanz. Zur Überführung von durch Luftschadstoffemissionen entstehenden externen Effekten in externe Kosten ist den 1990er Jahren in dem Projekt „ExternE“ der Wirkungspfadansatz entwickelt worden (EC 1995a), der auch heute noch Anwendung findet. Auch die Ökobilanzierung wurde im gleichen Zeitraum wissenschaftlich entwickelt und das erste Mal 1996 in einer Norm abgebildet, die aktuelle Version ist die DIN EN ISO 14040 (2009). Ein Vergleich bzw. eine Gegenüberstellung der beiden Methoden findet sich in der Literatur nur selten, Ausnahmen stellen RABL und HOLLAND (2008) sowie VOSS (2001) dar.

Beide Ansätze weisen methodische Überschneidungen und Unterschiede auf und finden vor allem in verschiedenen wissenschaftlichen Kreisen Anwendung. Externe Kosten werden im Verkehrs- und Energiesektor berechnet und dann von politischen Entscheidern verwendet, während die Ökobilanzierung insbesondere zur umwelttechnischen Bewertung von Produkten eingesetzt wird. Der in Abbildung 3.6 dargestellte Untersuchungsablauf ist dabei am Anfang identisch. Nach Definition des Untersuchungsrahmens werden die entstehenden Luftschadstoffe quantifiziert, in der Ökobilanz wird das Ergebnis als Sachbilanz bezeichnet. Danach weichen beide Methoden voneinander ab. Die Ökobilanz nimmt eine Klassifizierung vor (zu welchen Wirkungskategorien trägt welcher Schadstoff bei) und führt dann eine Charakterisierung aus (wie groß ist die potentielle Umweltwirkung in der jeweiligen Wirkungskategorie verglichen mit einem Referenzschadstoff). In der externen Kostenrechnung hingegen wird mit Hilfe eines Ausbreitungsmodells die räumliche Verteilung der Schadstoffe berechnet und dann die Auswirkungen auf verschiedene Schadensendpunkte bestimmt. Diese werden abschließend durch Verwendung von

Monetarisierungsfaktoren bewertet, so dass ein Vergleich mit den bauwerksbezogenen Kosten möglich ist. Beide Methoden können mit einer Ergebnisprüfung, z. B. mit der Prüfung von Sensitivitäten, abschließen.

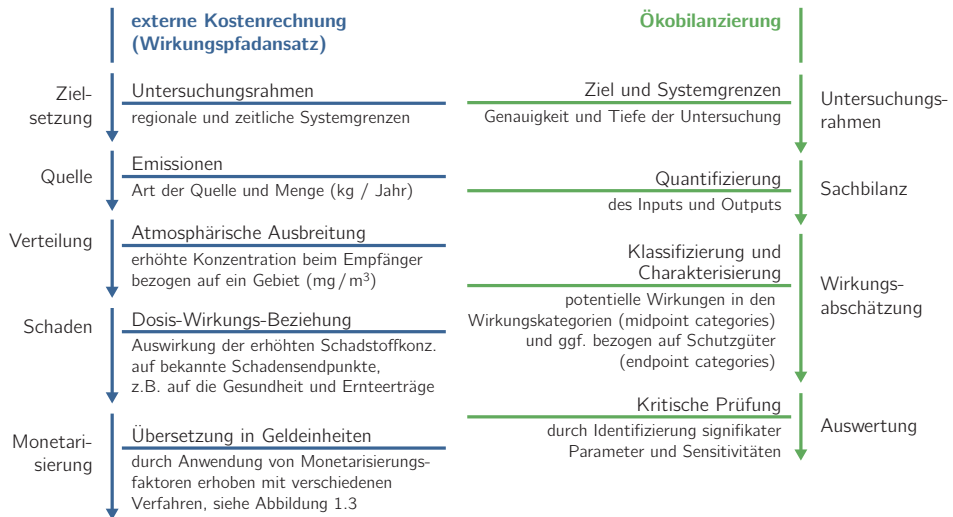


Abbildung 3.6: Durchzuführende Analyseschritte im Rahmen der externen Kostenrechnung auf Basis des Wirkungspfadansatzes für Luftschadstoffe (links) und Analyseschritte im Rahmen der Ökobilanzierung (rechts), aus Zinke et al. (2012a)

Der zentrale Unterschied beider Methoden ist damit die Bewertungsebene. Die externe Kostenrechnung stellt Ergebnisse als Endpoint-Indikatoren dar, die Ökobilanz weist i. d. R. die Wirkungen als Midpoint-Indikatoren in den einzelnen Wirkungskategorien aus. Es existieren auch Ansätze, die Ökobilanzierungsergebnisse in Endpoint-Indikatoren überführen, wobei das bekannteste Beispiel hierfür der Ecoindikator'99 ist. Dieser und weitere Ansätze werden u. a. in AHLROTH et al. (2011) und GERVÁSIO (2010) vorgestellt. Diese Vollaggregation ist in ihrer Anwendung aber nicht verbindlich und wird von Wissenschaftlern nur bedingt eingesetzt, da durch nicht bekannte Wirkmechanismen zusätzliche Ergebnisunsicherheiten entstehen können. Andererseits erzeugt ein Nebeneinander von mehreren nicht aggregierten Wirkungskategorien für Entscheider ein Deutungsproblem, wenn die Auswahl einer Ausführungsvariante erfolgen soll. Einen Überblick über die beiden Methoden sowie Vor- und Nachteile sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst.

Die vorhergehenden Betrachtungen zeigen, dass eine Einbeziehung von externen Effekten sowohl in die Ökobilanzierung als auch in die externe Kostenrechnung möglich ist

und beide Methoden für diese Anwendung Vor- und Nachteile besitzen. Da bisher keine Erkenntnisse über die im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken (dasselbe gilt für Infrastrukturbauwerke) am zielführendsten einzusetzende Methode vorliegen, werden hier beide Methoden angewendet und die jeweiligen Auswirkungen auf die Gestaltung von Entscheidungsunterstützungssystemen untersucht.

Tabelle 3.1: Vergleich der externen Kostenrechnung mit der Berücksichtigung externer Effekte in der Ökobilanzierung

Aspekte	externe Kostenrechnung	externe Effekte in der Ökobilanzierung
Vorgehen	Bewertung von (potentiell) eintretenden Schäden in Geldeinheiten (bewerteter Schadensendpunkt)	Integration externer Effekte in definierte Wirkungskategorien (Ausweisen potentieller Schädigungen)
Bewertungsebene	Endpoint-Indikator	Midpoint-Indikatoren
typische Anwender	Ökonomen, vor allem im Energie- und Verkehrssektor	Umweltwissenschaftler
Grundlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Methodenkonvention des UBA</li> <li>- EWS 1997, zukünftig RWS (Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- DIN ISO EN 14040 ff. (methodische Grundlagen)</li> <li>- DIN EN 15978 (Anwendung für Bauwerke)</li> </ul>
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vergleich mit direkten Kosten (Herstellungskosten, Lebenszykluskosten etc.) ist möglich</li> <li>- gute Grundlage für Entscheider</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wissenschaftlich anerkannte und normativ geregelte Methode</li> <li>- alle Umweltwirkungen (Bauwerk und externe Effekte) werden einheitlich bewertet</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sehr große Ergebnisunsicherheiten (zusätzliche Unsicherheit Monetarisierung)</li> <li>- Wirkungen auf Schadensendpunkte nicht für alle Wirkungsketten bekannt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- große Ergebnisunsicherheiten</li> <li>- Interpretation durch Fachleute notwendig, da i.d.R. keine (objektive) Wichtung der Wirkungskategorien stattfindet</li> </ul>

### 3.2.4 Diskontierung

Die Diskontierung von Kosten entstehend im Lebenszyklus von Bauwerken oder Produkten ist Grundlage für eine dynamische Berücksichtigung der jahresbezogenen Geldflüsse. Die Höhe der Diskontierungsrate ist dabei von zwei Aspekten abhängig: Erstens wird davon ausgegangen, dass die Gesellschaft aufgrund von Wachstum in der Zukunft wohlhabender sein wird und damit eine Vermehrung der Vermögen einhergeht (ELLINGHAM und FAWCETT 2006). Anders ausgedrückt wird in einem Jahr ein Euro aufgrund von Anlagemöglichkeiten auf dem Markt mehr Wert sein als heute. Zweitens existiert eine Zeitpräferenz aller Menschen, einen bestimmten Betrag lieber heute zu besitzen als in Zukunft. Bei der Diskontierung von externen Kosten muss die Besonderheit beachtet werden, dass über sehr lange Zeiträume und damit generationenübergreifend diskontiert

wird und über die Präferenzen zukünftiger Generationen nur Annahmen getroffen werden können (UBA 2012).

Welche soziale Diskontierungsrate für externe Kosten Anwendung finden soll, wird in der Literatur ausführlich diskutiert und es gibt keine einheitliche Meinung, siehe u. a. ALMANSA und MARTÍNEZ-PAZ (2011) sowie AZAR und STERNER (1996). Bei allen Analysen muss beachtet werden, von welcher Diskontierungsrate gesprochen wird. In dieser Arbeit wird für die bauwerksbezogenen Kosten und für die zu berechnenden externen Kosten *keine* Kostensteigerungsrate angesetzt. Deshalb muss für die Berechnung von Barwerten eine reale Diskontierungsrate Anwendung finden, siehe auch RABL (1996). Diese wird in den meisten Untersuchungen allerdings nicht ausgewiesen, sondern es werden nominale Werte angegeben. Eine Berechnung unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer Kostensteigerungs- und Diskontierungsrate kann mit Gl. 3.1 erfolgen:

$$K(0) = \sum_{t=0}^n k_t \cdot \frac{(1+s)^t}{(1+d)^t} = k_0 + k_1 \cdot \frac{(1+s)}{(1+d)} + k_2 \cdot \frac{(1+s)^2}{(1+d)^2} + \dots + k_n \cdot \left( \frac{1+s}{1+d} \right)^n \quad (3.1)$$

mit  $K(0)$  = Barwert der Kostenreihe zum Zeitpunkt  $t=0$

$t$  = Jahr der Bewertung,  $t=0\dots n$

$k_t$  = Kosten im jeweiligen Bezugsjahr  $t$

$s$  = Steigerungsrate der Kosten (u. a. mit den Ursachen Inflation,

Veränderungen im Wettbewerb bzw. von Angebot und Nachfrage)

$d$  = nominale Diskontierungsrate

Wenn unter Berücksichtigung von Gl. 3.2 eine reale Diskontierungsrate  $d_{\text{real}}$  ausgewiesen wird

$$\frac{1+s}{1+d} = \frac{1}{1+d_{\text{real}}}, \quad \text{wobei } d_{\text{real}} = \frac{d-s}{1+s} \quad (3.2)$$

kann die Gl. 3.1 in die von einer Diskontierungsrate abhängigen Gleichung Gl. 3.3 überführt werden:

$$K(0) = \sum_{t=0}^n k_t \cdot \frac{1}{(1+d_{\text{real}})^t} \quad (3.3)$$

Die reale Diskontierungsrate  $d_{\text{real}}$  führt dabei die Kostensteigerungsrate und die Diskontierungsrate zusammen und zeigt, dass im Rahmen der Auf- und Abzinsungsrechnungen

nicht einfach die Differenz der beiden Werte gebildet werden kann. In der deutschen Methodenkonvention (UBA 2012) wird bei langen Untersuchungszeiträumen empfohlen, die soziale Diskontierungsrate für externe Kosten gleich dem Wachstum zu setzen und hierfür einen Wert von 1,5 % anzunehmen. Unter der Annahme einer Kostensteigerungsrate von 0,5 bis 1 % ergibt sich damit eine reale soziale Diskontierungsrate von unter 1 %. Diese Annahme deckt sich beispielsweise mit RABL (1996), der einen Wert nahe Null empfiehlt. Da in dieser Arbeit über die externe Kostenrechnung hinaus eine Berücksichtigung von externen Effekten in der Ökobilanzierung erfolgen soll, die keine Diskontierung von Umwelteffekten vornimmt, stellt die Annahme von einer realen sozialen Diskontierungsrate von Null die Voraussetzung für eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Methoden dar und wird daher im Weiteren für alle externen Kosten angesetzt.

## 3.3 Monetarisierungsansätze

### 3.3.1 Festlegungen

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, stellt die externe Kostenrechnung für Analysen im Infrastrukturbereich ein wichtiges Instrument dar. Da die in dieser Arbeit zu untersuchenden externen Kosten von der typischen Definition von makroökonomischen Studien abweicht, müssen die zu wählenden Monetarisierungsansätze auf das Untersuchungsziel ausgerichtet werden. Die folgenden Festlegungen bilden die Grundlage für die aufgabenspezifische Auswahl der Monetarisierungsansätze.

In dieser Arbeit werden Durchschnitts- bzw. Grenzkosten als Eingangswerte verwendet, die wie beschrieben länderspezifisch und regionenabhängig sind. Es findet eine Konzentration auf deutsche Verhältnisse statt, wobei davon ausgegangen wird, dass die zu untersuchenden Brücken einer außerstädtischen Verkehrsbelastung unterliegen. Im Regelfall handelt es sich dabei um Autobahnen bzw. Bundesstraßen, die als oben- bzw. untenliegende Verkehrssituation auftreten. Urbane Randbedingungen werden nicht betrachtet. Als Verkehrsträger wird nur der Straßenverkehr untersucht.

Als Grundlage für die Ermittlung der Monetarisierungsansätze werden bevorzugt die europäische Metastudie „Handbook on External Costs of Transport“ und die deutsche Metastudie „Methodenkonvention des UBA“ verwendet. Da die jeweils neueste Aktualisierung beider Studien nicht immer die für diese Arbeit erforderlichen Kategorien bereitstellt, wird teilweise auch auf ältere Studienstände zurückgegriffen. Bei einigen externen

Kostenkategorien (z. B. Verspätungskosten und Unfälle) müssen weitere Studien miteinbezogen werden, da Durchschnittskostenansätze häufig auf gefahrene Fahrzeugkilometer bezogen werden. Dieser Ansatz kann aber aufgrund der anzuwendenden Differenzbetrachtung zwischen Normal- und Baustellenbetrieb nicht verwendet werden.

Mit der in den letzten Jahren zunehmenden Anzahl an Studien wurden die methodischen Grundlagen verfeinert und in einigen Schadensbereichen – wie Materialschäden und emissionsbedingte Erkrankungen – sind abgesicherte Untergrenzen der Monetarisierungsansätze vorhanden. In anderen Kategorien ist dies noch nicht der Fall, beispielsweise bei der globalen Bewertung der Folgen der Klimaveränderung (UBA 2007). Auf dieser Grundlage lässt sich feststellen, dass sich Bandbreiten zwar durch die genaue Aufschlüsselung der verwendeten Annahmen und Randbedingungen eingrenzen, allerdings nicht vollständig verhindern lassen. Zur Erstellung einer den heutigen Erkenntnisstand und die Natur der externen Kosten richtig abbildenden Analyse ist daher die Verwendung von einem Intervall des jeweiligen Monetarisierungsansatzes sinnvoll. Im Folgenden wird für die einzelnen externen Kostenkategorien jeweils ein robuster Monetarisierungsansatz herausgearbeitet, der für die deterministischen Berechnungen verwendet wird, sowie eine Bandbreite mit der dazugehörigen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung abgeleitet, die als Eingangswert für die Unsicherheitsanalysen dient. Als Dichtefunktion wird (analog zu ISO 15686-4 (2014)) bevorzugt eine Dreiecks- bzw. Trapezverteilung verwendet, da die Stützpunkte sich aus den vorliegenden Studien zu externen Kosten ableiten lassen. Des Weiteren ist die Darstellung als Normalverteilung möglich. Eine Übersicht der für die Beschreibung der drei Verteilungen notwendigen Parameter findet sich in Abbildung 3.7.

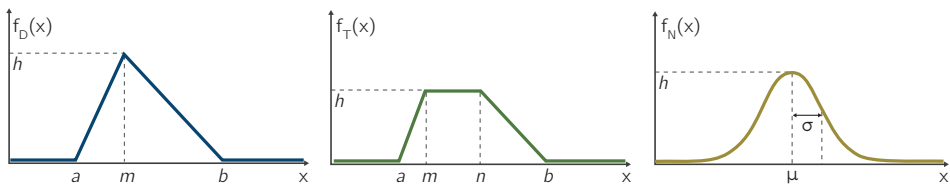


Abbildung 3.7: Parameter zur Beschreibung der zu verwendenden Dichtefunktionen: Dreiecksverteilung, Trapezverteilung und Normalverteilung

Monetarisierungsansätze werden wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben mit verschiedenen Erhebungsverfahren ermittelt und haben in verschiedenen Studien oftmals unterschiedliche Bezugsjahre. Für die Umrechnung auf andere Bezugsjahre wird i. d. R. ein Verbraucherpreisindex zu Grunde gelegt. In dieser Arbeit wird analog zu UBA (2012) der Harmonisierte Verbraucherpreisindex (HVPI) für Deutschland verwendet, der vom Statistischen



Bundesamt berechnet wird (ELBEL und PREISSMANN 2012). Alle Monetarisierungsansätze werden einheitlich auf das Jahr 2012 bezogen.

### 3.3.2 Verspätungskosten

Verspätungskosten werden auf Grundlage des Wertes der Reisezeit berechnet. Dabei muss zwischen Berufsverkehr (PKW und LKW) und Freizeitverkehr (nur PKW) unterschieden werden, deren Wertansätze sich deutlich unterscheiden. Die Bestimmung des Zeitkostenansatzes für Arbeitszeit wird häufig auf Grundlage der Ausfallkosten produktiver Arbeitszeit bestimmt, der Freizeitverkehr kann z. B. mit dem Zahlungsbereitschaftsansatz (ein Verfahren des Contingent Valuation, siehe Abbildung 3.3) im Rahmen einer Umfrage bewertet werden (HEATCO 2006). In der Fachwelt existiert ein methodischer Konsens zur Modellierung der Verspätungskosten, der anhand von Geschwindigkeitsprofilen und den daraus entstehenden Zeitverlusten bzw. -gewinnen berechnet wird (MAIBACH et al. 2008). Eine ausführliche Meta-Analyse von verschiedenen Zeitkostenansätzen wird in SHIRES und JONG (2006) durchgeführt. Diese Analyse ist Grundlage für die Empfehlungen des Projekts HEATCO (2006), dessen Ergebnisse in vielen nachfolgenden Studien aufgegriffen werden. HEATCO ist gleichzeitig die umfangreichste und aktuellste Studie zu Zeitkostenansätzen mit einem externen Kostenstand von 2002. Die in Deutschland durch die EWS (1997) bereitgestellten Kostenansätze liegen deutlich unterhalb dieser Werte und müssen als veraltet angesehen werden.

Tabelle 3.2: Monetarisierungsansätze für Zeitkosten als Grundlage für deterministische Berechnungen, Bezugsjahr 2012, basierend auf HEATCO (2006)

Komponente	Randbedingungen	Ansatz	Einheit
Zeitkosten	PKW, Arbeitszeit, Deutschland, nur Fahrer	29,83	EUR/h
Zeitkosten	PKW, Freizeit, Langstrecke, Deutschland, nur Fahrer	9,27	EUR/h
Zeitkosten	PKW Durchschnitt, Annahme: 50% Arbeitszeit und 50% Freizeit, nur Fahrer	19,55	EUR/h
Zeitkosten	LKW, Deutschland, Annahme: Durchschnitt 11t Ladegewicht	39,39	EUR/h

Die für die deterministische externe Kostenberechnung zu verwendenden Zeitkostenansätze sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Wie beschrieben, wird für PKW zwischen Freizeit und Arbeitszeit unterschieden. Im Berechnungsmodell wird allerdings nicht mit variablen Anteilen von Arbeits- und Freizeit gerechnet, sondern es wird von einem festen durchschnittlichen Arbeitszeitanteil am Verkehrsaufkommen von 50 % ausgegangen. Des

Weiteren wird angenommen, dass die PKW mit nur einer Person besetzt sind, was dazu führt, dass der PKW-Ansatz von 19,55 EUR/h ein niedriger Wert ist. Für LKW wird ein Kostenansatz von 3,58 EUR/(h · Frachttonne) unter Annahme eines durchschnittlichen Beladungsgewichtes von 11 Tonnen verwendet.

Zur Bestimmung der trapezförmigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für den Zeitkostenansatz für PKW wird für den Minimalwert a von einem reinen Freizeitanteil mit einer durchschnittlichen Personenanzahl von 1,5 Personen ausgegangen (9,27 EUR/h · 1,5). Der Maximalwert b wird auch mit einer durchschnittlichen PKW-Insassenanzahl von 1,5 Personen berechnet, bezogen auf einen Kostenansatz mit 50 % Arbeitszeitanteil am Verkehrsaufkommen (19,55 EUR/h · 1,5). Für den Wert m wird der PKW-Durchschnittswert von 19,55 EUR/h gewählt, für n ein Arbeitszeitanteil von 80 % und ein Freizeitanteil von 20 % mit jeweils einem Fahrer (25,71 EUR/h). Die Minimal- und Maximalwerte für LKW werden unter Annahme eines durchschnittlichen Beladungsgewichtes von 8 t bzw. 14 t bestimmt, der Wert m mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit ist derselbe wie in dem deterministischen Ansatz für LKW.

Tabelle 3.3: Parameter zur Definition der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Monetarisierungsansätzen für Zeitkosten, Bezugsjahr 2012

Komponente	Beschreibung	Verteilung	a	b	m	n
Zeitkosten	Dichtefunktion Zeitkosten PKW	trapezförmig	13,90 EUR/h	29,32 EUR/h	19,55 EUR/h	25,71 EUR/h
Zeitkosten	Dichtefunktion Zeitkosten LKW	dreiecksförmig	28,65 EUR/h	50,14 EUR/h	39,39 EUR/h	-

### 3.3.3 Betriebskosten

Die in die Analysen zu integrierenden Fahrzeugsbetriebskosten werden in zwei Teile zerlegt: Treibstoffkosten und weitere Betriebskosten für gefahrene Mehrkilometer. Die Treibstoffkosten werden separat ausgewiesen, da sie auf Grundlage der durchschnittlichen Geschwindigkeit der PKW- bzw. LKW-Flotte als Differenz zwischen dem Normal- und Baustellenbetrieb berechnet werden (Modellerläuterungen siehe Anhang E.2.5). Als Kostenansatz werden die durchschnittlichen Werte des Jahres 2012 verwendet, getrennt nach Benzin- und Dieselkosten. Für den Ansatz der sonstigen kilometerbezogenen Betriebskosten findet für PKW und LKW eine Abschätzung auf Grundlage von ADAC (2013), EBERHARDT et al. (2013) und VSS (2007) statt. In dem Kostenansatz werden Versicherungen, Steuern und Instandhaltungsmaßnahmen wie Ölwechsel oder Reifenerneuerung

einer für Deutschland repräsentativen Fahrzeugflotte berücksichtigt. Da bei einer Kapazitätsreduzierung durch Baustellen i. d. R. sich nur die Geschwindigkeitsprofile ändern und keine Mehrkilometer zurückgelegt werden, entstehen nach dem hier gewählten Berechnungsmodell in den meisten Fällen nur Treibstoffmehrkosten und keine sonstigen Betriebskosten durch die Einrichtung von Baustellen. Nur im Fall von Umfahrungen finden sie in die Berechnungen Eingang. Die Ansätze sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Tabelle 3.4: Monetarisierungsansätze für Treibstoff- und sonstige Betriebskosten als Grundlage für deterministische Berechnungen, Bezugsjahr 2012

Komponente	Randbedingungen	Ansatz	Einheit
Treibstoffkosten	Treibstoff Benzin für PKW, Durchschnitt 2012	1,64	EUR/l
Treibstoffkosten	Treibstoff Diesel für PKW und LKW, Durchschnitt 2012	1,49	EUR/l
Betriebskosten	Betriebskosten PKW für Mehrkilometer (Umfahrungen), ohne Treibstoffkosten	0,28	EUR/km
Betriebskosten	Betriebskosten LKW für Mehrkilometer (Umfahrungen), ohne Treibstoffkosten	0,86	EUR/km

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen aller Betriebskosten werden als dreiecksförmige Verteilung festgelegt, wobei für die Treibstoffkosten eine maximale Abweichung nach unten/oben von -10 %/ +5 % angesetzt wird. Die größere Abweichung nach unten wird mit dem im Jahr 2012 vergleichsweise hohen Treibstoffpreisen begründet. Für die Betriebskosten werden für die Minimal-/Maximalwerte Bandbreiten von -5 %/ +5 % bezogen auf den jeweiligen Werte aus Tabelle 3.4 angesetzt. Der Wert mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit entspricht für alle Komponenten dem Kostenansatz für die deterministischen Berechnungen. Tabelle 3.5 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tabelle 3.5: Parameter zur Definition der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Monetarisierungsansätzen für Treibstoff- und sonstige Betriebskosten, Bezugsjahr 2012

Komponente	Beschreibung	Verteilung	a	b	m	n
Treibstoffkosten	Dichtefunktion Kostenansatz Benzin	dreiecksförmig	1,48 EUR/l	1,72 EUR/l	1,64 EUR/l	-
Treibstoffkosten	Dichtefunktion Kostenansatz Diesel	dreiecksförmig	1,34 EUR/l	1,56 EUR/l	1,49 EUR/l	-
Betriebskosten	Dichtefunktion Betriebskosten PKW	dreiecksförmig	0,27 EUR/km	0,29 EUR/km	0,28 EUR/km	-
Betriebskosten	Dichtefunktion Betriebskosten LKW	dreiecksförmig	0,82 EUR/km	0,90 EUR/km	0,86 EUR/km	-

### 3.3.4 Klimaerwärmung und Luftschadstoffe

Für den externen Effekt der Klimaerwärmung existieren je nach Analysehorizont unterschiedliche Monetarisierungsansätze für kurz-, mittel- und langfristige Betrachtungen. Der im Zeitverlauf steigende Ansatz wird damit begründet, dass zuerst die kostengünstigsten Vermeidungsoptionen umgesetzt werden (UBA 2012). Eine zeitliche Abhängigkeit der Monetarisierungsansätze wird hier allerdings nicht abgebildet, da dieser nur für den externen Effekt der Klimaerwärmung existiert und ein zu den übrigen externen Effekten konsistentes Modell erstellt werden soll. Es wird daher für Kohlenstoffdioxid als zentraler Monetarisierungsansatz 84 EUR/(t CO<sub>2</sub>) bezogen auf das Jahr 2012 verwendet, der in Deutschland einem mittleren Wert bei kurzfristigen Zeithorizonten entspricht. Die weiteren Treibhausgase werden für Methan mit dem 25-fachen und für Distickstoffmonoxid (Lachgas) mit dem 298-fachen des Wertes für Kohlenstoffdioxid angesetzt. Alle Angaben basieren auf UBA (2012).

Die Monetarisierungsansätze für Luftschadstoffe bauen auch vollständig auf den Empfehlungen in UBA (2012) für Emissionen des Straßenverkehrs auf und sind auf das Jahr 2012 umgerechnet. Für den Feinstaubansatz wird der Wert für PM<sub>2,5</sub> verwendet, allerdings ohne den Faktor 1,5 für Emissionen aus Verbrennungsmotoren, der erst bei der Definition der Dichtefunktion Eingang findet. Alle Ansätze sind in Tabelle 3.6 dargestellt.

Tabelle 3.6: Monetarisierungsansätze für Klima- und Luftschadstoffe als Grundlage für deterministische Berechnungen basierend auf (UBA 2012), Bezugsjahr 2012, Werte gerundet

Komponente	Randbedingungen	Ansatz	Einheit
Kohlenstoffdioxid	CO <sub>2</sub> -Emissionen in die Luft (Treibhausgas)	84	EUR/t CO <sub>2</sub>
Methan	CH <sub>4</sub> -Emissionen in die Luft (Treibhausgas)	2.090	EUR/t CH <sub>4</sub>
Distickstoffmonoxid	N <sub>2</sub> O-Emissionen in die Luft (Treibhausgas)	25.000	EUR/t N <sub>2</sub> O
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub> -Emissionen in die Luft (NO und NO <sub>2</sub> )	16.100	EUR/t NO <sub>x</sub>
Feinstaub	PM (Particulate Matter, Ansatz für PM <sub>2,5</sub> aus Auspuff)	85.700	EUR/t PM
Nicht Methan Kohlenwasserstoffe	NMHC-Emissionen in die Luft	1.780	EUR/t NMHC
Schwefeldioxid	SO <sub>2</sub> -Emissionen in die Luft	13.800	EUR/t SO <sub>2</sub>
Ammoniak	NH <sub>3</sub> -Emissionen in die Luft	28.100	EUR/t NH <sub>3</sub>

Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen für die Monetarisierungsansätze der Treibhausgase berücksichtigen die im Zeitverlauf zunehmenden Auswirkungen, indem sie mit sehr hohen Maximalwerten der trapezförmigen Verteilung versehen werden. Für Kohlenstoffdioxid wird als oberer Grenzwert b die Empfehlung aus UBA (2012) für den oberen Wert

von mittelfristigen Analysen angesetzt, für die Werte a, m und n werden die auf das Jahr 2012 bezogenen Werte-Bandbreiten von kurzfristigen Analysen verwendet. Für Methan und Distickstoffmonoxid finden jeweils die oben genannten und auf Kohlenstoffdioxid bezogenen Erhöhungsfaktoren Anwendung. Die dreiecksförmigen Verteilungen für die Luftschadstoffe entsprechen im Minimalwert a den Empfehlungen aus UBA (2012) für durchschnittliche EU-Monetarisierungsansätze, die Maximalwerte b stammen jeweils aus EC (2014). Für PM<sub>2,5</sub> wird abweichend als Maximalwert der in UBA (2012) genannte Faktor von 1,5 für Verbrennungsmotoren berücksichtigt und ausgehend vom deterministischen Ansatz berechnet ( $1,5 \cdot 85.700 \text{ EUR}/(\text{t PM}_{2,5})$ ). Die Werte m mit der höchsten Eintrittswahrscheinlichkeit sind alle mit den jeweiligen deterministischen Ansätzen identisch. Tabelle 3.7 beinhaltet die auf das Jahr 2012 bezogenen und gerundeten Werte.

Tabelle 3.7: Parameter zur Definition der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Monetarisierungsansätzen für Klima- und Luftschadstoffe, Bezugsjahr 2012, Werte gerundet und auf eine Tonne Emission der jeweiligen Komponente bezogen

Komponente	Beschreibung	Verteilung	a	b	m	n
Kohlenstoffdioxid	Dichtefunktion CO <sub>2</sub> (Treibhausgas)	trapezförmig	42 EUR/tEm	225 EUR/tEm	84 EUR/tEm	126 EUR/tEm
Methan	Dichtefunktion CH <sub>4</sub> (Treibhausgas)	trapezförmig	1.050 EUR/tEm	5.630 EUR/tEm	2.090 EUR/tEm	3.150 EUR/tEm
Distickstoffmonoxid	Dichtefunktion N <sub>2</sub> O (Treibhausgas)	trapezförmig	12.500 EUR/tEm	67.100 EUR/tEm	25.000 EUR/tEm	37.500 EUR/tEm
Stickstoffoxide	Dichtefunktion NO <sub>x</sub>	dreiecksförmig	10.800 EUR/tEm	17.800 EUR/tEm	16.100 EUR/tEm	-
Feinstaub	Dichtefunktion PM	dreiecksförmig	56.800 EUR/tEm	128.600 EUR/tEm	85.700 EUR/tEm	-
Nicht Methan Kohlenwasserstoffe	Dichtefunktion NMHC	dreiecksförmig	1.570 EUR/tEm	1.950 EUR/tEm	1.780 EUR/tEm	-
Schwefeldioxid	Dichtefunktion SO <sub>2</sub>	dreiecksförmig	10.600 EUR/tEm	15.200 EUR/tEm	13.800 EUR/tEm	-
Ammoniak	Dichtefunktion NH <sub>3</sub>	dreiecksförmig	20.000 EUR/tEm	36.200 EUR/tEm	28.100 EUR/tEm	-

### 3.3.5 Unfälle

Externe Unfallkosten spielen in absoluten Betrachtungen in Deutschland eine wichtige Rolle. Wie beschrieben wird in dieser Arbeit allerdings der Unterschied zwischen Normal- und Baustellenbetrieb untersucht, so dass zu integrierende Unfalleffekte aus dieser Diffe-

renzbetrachtung ermittelt werden müssen. Dabei muss die Änderung der Anzahl der Unfälle (Unfallraten) und die Änderung der Unfallschwere miteinbezogen werden, die sich in den unterschiedlichen Bereichen der Baustelle (Annäherungsbereich, Überleitungsbereiche und Baustelleninnenbereich) unterscheiden (BAKABA et al. 2012). Die durch Unfälle entstehenden volkswirtschaftlichen Kosten können mit der Unfallkostenrate (i. d. R. in EUR/(1000 Kfz-km) angegeben) abgebildet werden. Nach SÜMMERMANN (2012) können die Unterschiede zwischen Baustellen längerer Dauer und einer freien Strecke wie folgt charakterisiert werden:

- In Baustellenbereichen sind die pauschalen mittleren Unfallkostenraten halb so hoch wie auf freier Strecke.
- Schwere Unfallereignisse (Personenschaden oder schwerer Sachschaden) treten in Baustellen weniger häufig auf als auf freier Strecke, da die mittleren gefahrenen Geschwindigkeiten niedriger sind.
- Im Arbeitsstellenbereich erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens leichter Unfallereignisse (leichte Sachschäden) deutlich, so dass Baustellen als eine Unfallhäufungsstelle angesehen werden können.

Diese Punkte zeigen, dass die Einrichtung von Baustellen die Art und Häufigkeit der Unfallereignisse verändert, allerdings bei einer pauschalierten Betrachtung nicht zu höheren externen Unfallkosten führt. Die tatsächliche Höhe der baustellenspezifischen Unfallkostenraten ist von einer Vielzahl an Parametern abhängig, beispielsweise der Verkehrsführung, der Verkehrsbelastung, der Baustellengestaltung (u. a. Beschilderung und Art der Sicherheitseinrichtungen) und der Tages- bzw. Jahreszeit (BAKABA et al. 2012). Da für eine genaue Berechnung eine Vielzahl an Eingangsparametern festgelegt werden müssten, die in der Phase des Bauwerksentwurfs nicht eindeutig bestimmt werden können, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die externen Unfallkosten im Baustellenbereich denen auf freier Strecke entsprechen. Darüber hinaus wird auch der Effekt der zusätzlichen Kapazitätsreduzierung durch in Baustellen auftretende Unfälle nicht integriert, da dieser Aspekt extrem sensitiv auf die Definition der Eingangsparameter reagiert und damit nur mit großen Unsicherheiten bestimmt werden könnte.

#### 3.3.6 Lärm

Lärmemission des Verkehrs spielen vor allem in städtischen Gebieten oder in außerstädtischen Gebieten bei einer Beeinflussung von Siedlungsstrukturen eine Rolle. Im ländlichen

Raum ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass Lärm eine untergeordnete Bedeutung einnimmt. Diese Expositionsabhängigkeit zeigt sich auch in den stark abnehmenden Lärm-Grenzkosten in ländlichen Gebieten (EC 2014). Lärmemissionen bei Brücken werden stark von Fahrbahnübergängen bestimmt (LFU 2000), zusätzlich spielen Steifigkeiten, Fahrbahnbeläge, Fahrbahnneigungen, die Trennung der Fahrbahnplatten, die Art der Geländerkonstruktionen und Lärmschutzwände eine wichtige Rolle (FOGIB 1997).

Es ist ersichtlich, dass der externe Effekt Lärm vor allem im Regelbetrieb von Bedeutung ist und die Höhe von entstehenden externen Kosten stark von dem Abstand zu Siedlungsstrukturen abhängt. Für die zu untersuchenden Brücken wird die Makrolage als außerorts definiert, so dass grundlegend von niedrigen externen Lärmkosten ausgegangen werden kann. Darüber hinaus wird zwar die Verkehrsbelastung klassifiziert, allerdings findet keine Spezifizierung der Mikrolage statt, womit auch keine Berechnung der genauen Lärmexposition und damit der externen Lärmkosten erfolgen kann. Es existieren aber in FOGIB (1997) qualitative Bewertungsansätze, die einen Vergleich von Konstruktionsvarianten hinsichtlich ihrer Luftschallemissionen ermöglichen.

#### **3.3.7 Landveränderung**

Dieser Aspekt der externen Kostenrechnung wird auch als „Natur und Landschaft“ bezeichnet und beinhaltet nach UVEK (2003) die Aspekte des Habitatverlustes (Bodennutzung durch Bebauung), der Verminderung der Qualität von Habitaten (Beeinflussungen durch Lärm und Schadstoffe) sowie der Trennwirkung von Straßen (Landschaftszerstörung und Wanderbehinderung). Diese Aspekte sind vor allem in der Phase der Trassenbestimmung beim Vergleich verschiedener Linienführungen von Bedeutung.

In der in dieser Arbeit untersuchten Phase des Bauwerksvariantenvergleichs ist die Trassenführung bereits definiert. Da der Standort aller Bauwerke identisch ist und sie dieselbe Funktion im Netz erfüllen, wird davon ausgegangen, dass die Auswirkungen der Landveränderung für alle untersuchten Varianten identisch sind und damit ausgeklammert werden können.

#### **3.3.8 Vor- und nachgelagerte Prozesse**

In vor- und nachgelagerten Prozessen werden die Aufwendungen für die Produktion von Energieträgern (beispielsweise Treibstoffen) sowie die Herstellung von Fahrzeugen und

Infrastrukturen erfasst (MAIBACH et al. 2008). Vor- und nachgelagerte Prozesse haben im Vergleich zu den sonstigen externen Kostenbestandteilen einen vergleichsweise geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis (INFRAS/IIW 2007). Für die hier durchgeführten Differenzbetrachtungen kann festgehalten werden, dass die Herstellung von Fahrzeugen und Infrastrukturen größtenteils schon in den externen Kosten im Normalbetrieb erfasst sind und durch eine Einrichtung von Baustellen i. d. R. nicht vergrößert werden. Für die Berechnung der zusätzlichen Treibstoffkosten wird ein Marktpreisansatz verwendet, in dem die Vorketten vollständig eingepreist sind.

Im Fall von anfallenden Mehrkilometern, die bei Umfahrungen entstehen, werden zusätzlich die Fahrzeugbetriebskosten berücksichtigt, die ein Bestandteil von vor- und nachgelagerten Prozessen sind. Anteile, die aus der Bereitstellung der Straßeninfrastruktur (Straßenherstellung, Instandhaltungsmaßnahmen etc.) entstehen, werden aufgrund ihres geringen Einflusses vernachlässigt. Nach EC (2014) liegen die Grenzkosten für alle vor- und nachgelagerten Prozesse von PKW zwischen 0,5 bis 1 Cent/Fahrzeugkilometer. Insgesamt ist ersichtlich, dass in dieser Arbeit nur ein Teil der in vor- und nachgelagerten Prozessen erfassten Kostenkomponenten abgebildet werden.

#### **3.3.9 Zusammenfassung**

Externe Kosten des Straßenverkehrs sind seit den 1990er Jahren in einer Reihe von Studien untersucht worden und es existiert heutzutage eine gute Datenbasis. Die in dieser Arbeit zu analysierenden externen Effekte, die aus der Differenz von Normal- und Baustellenbetrieb berechnet werden müssen, machen eine anwendungsbezogene Definition der Monetarisierungsansätze erforderlich.

An den Ausführungen zur Herleitung der Monetarisierungsansätze ist zu erkennen, dass alle Werte auf Grundlage des Standes der Technik, für den deutschen Raum und mit dem Bezugsjahr 2012 festgelegt werden. Die Werteauswahl kann allerdings nicht vollständig objektiv erfolgen, was mit studienspezifischen Erhebungsunterschieden, Unsicherheiten bei der Bewertung der Schadensendpunkte, langen Prognosezeiträumen (vor allem für den externen Effekt der Klimaveränderung) und der daraus resultierenden Notwendigkeit des Treffens von Annahmen begründet werden kann. Wie in UBA (2012) empfohlen, findet daher auch die Verwendung von Bandbreiten von Monetarisierungsansätzen statt. Im Folgenden werden sowohl deterministische als auch probabilistische Untersuchungen durchgeführt, die jeweils unterschiedliche Eingangswerte benötigen. Diese sind in Abbildung 3.8 zusammengestellt.



### 3.3 Monetarisierungsansätze

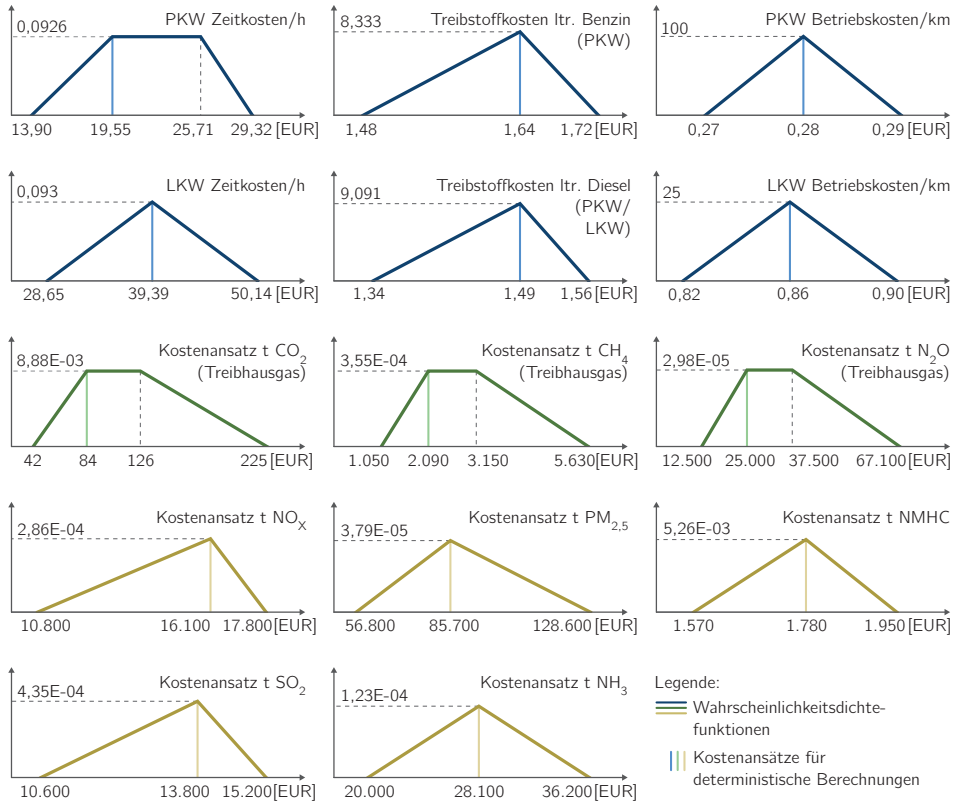


Abbildung 3.8: Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Monetarisierungsansätze und deterministische Monetarisierungsansätze als Eingangswerte für die Berechnung von externen Kosten, gerundete Werte für das Bezugsjahr 2012



## 4 Brückenlebenszyklus

„Prognosen sind schwierig, besonders wenn sie die Zukunft betreffen.“ Dieses Zitat wird u. a. Mark Twain, Winston Churchill, Karl Valentin und Niels Bohr zugeschrieben und veranschaulicht die Herausforderung, zukünftige Umweltzustände zu beschreiben. Genau dies ist auch eine inhärente Aufgabenstellung bei der Abbildung des Brückenlebenszyklus. Aufgrund des ganzheitlichen Anspruchs von Nachhaltigkeitsanalysen soll die vollständige Lebensdauer von der Herstellung über die Nutzung bis zum Rückbau abgebildet werden. Da die Lebensdauer von Brücken i. d. R. mit 100 Jahre anzusetzen ist (DIN EN 1990: 2010), muss das Ergebnis eher als eine probabilistische Prognose und nicht als akkurate Beschreibung bezeichnet werden.

Die durch vielfältige Beeinflussungsparameter und sehr lange Brückenlebenszyklen entstehenden Unsicherheiten werden heutzutage oftmals in den Berechnungen vernachlässigt. Allerdings stellt die Kenntnis des möglichen Ergebnisraums eine wichtige Information für die Entscheidungsfindung dar. Des Weiteren können deterministische Ergebnisse deutlich besser eingeordnet werden, wenn bekannt ist, wie groß die Ergebnisbandbreite ist. In diesem Kapitel wird daher zunächst in grundlegende Lebenszyklusaspekte eingeführt, danach folgt die Darstellung der Ergebnisaufbereitung der für die Herleitung von Instandhaltungsstrategien durchgeführten Realdatenanalyse und abschließend werden die Bauzeitansätze erläutert. Dabei finden die in Anhang A.1 und A.2 aufgeführten Definitionen und Begriffe Anwendung.

### 4.1 Analysegrundlagen

#### 4.1.1 Bauteilgruppen

Als einfachstes Modell zur Beschreibung von Auswirkungen in der Nutzungsphase kann ein pauschalierter Ansatz genannt werden, bei dem ein Bezug auf die Auswirkungen der Herstellungsphase verwendet wird. Hierbei werden beispielsweise die Gesamtherstellungskosten für eine Brücke mit einem jährlichen Prozentsatz von 2 % multipliziert, um alle Instandhaltungsmaßnahmen zu erfassen (RI-WI-BRÜ 2007). Ein solcher Ansatz ist

einfach anwendbar, hat aber den großen Nachteil, dass bei einer Berechnung in verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen keine konsistente Modellierung von ökonomischen, ökologischen und sozialen Auswirkungen erfolgen kann.

Um dies zu ermöglichen und vor allem maßnahmenspezifische Verkehrsführungen definieren zu können, wird der Lebenszyklus vollständig auf Bauteilebene abgebildet. Abbildung 4.1 beinhaltet die Bauteilgruppen, in die das Gesamtbauwerk unterteilt wird.

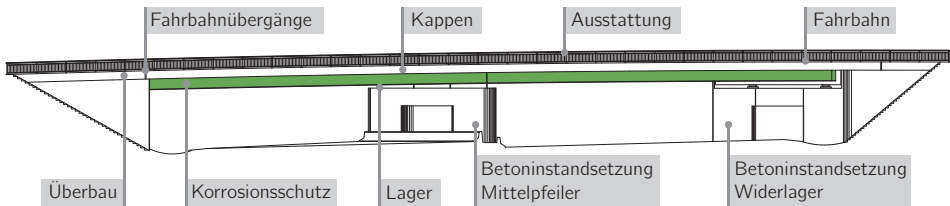


Abbildung 4.1: Für die Modellierung von Instandhaltungsmaßnahmen zu verwendende Bauteilgruppen

### 4.1.2 Degradation und Instandhaltungsstrategien

Alle Bauteile und Bauwerke sind einer Alterung unterworfen, die auch als Degradation bezeichnet wird. Je nach Schadensmechanismus (beispielsweise Ermüdung, Karbonatisierung oder Korrosion) sind für eine modellgebundene Beschreibung des Degradationsverlaufs verschiedene Einflussfaktoren zu integrieren, siehe z. B. RADOMSKI (2002). Die Aussagequalität solcher oft für Lebensdauervorhersagen eingesetzten Degradationsmodelle ist allerdings an die Qualität der Eingangsdaten gebunden, die bei einem Analysehorizont von 100 Jahren nicht exakt bestimmt werden können.

In dieser Arbeit wird daher auf theoretischen Referenz-Nutzungsdauern bzw. Erhaltungszeiträumen aufgebaut, die aus Literaturangaben und einer Realdatenanalyse gewonnen werden. Für den Hochbau existieren umfangreiche Untersuchungen zum Alterungsverhalten von Bauteilen, die Degradationsverläufe mit Bandbreiten ermitteln (BFK 1994). In Anlehnung hieran sind in Abbildung 4.2 qualitative Degradationskurven dargestellt. Die blauen Kurven charakterisieren eine Anwendung im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen. Nach Festlegung des Lebenszyklus  $t$  wird ersichtlich, dass bei Verwendung der Referenz-Nutzungsdauer zwei Mal im Lebenszyklus eine Erneuerung des Bauteils erfolgen muss. In erster Näherung wird der Erneuerungszyklus daher auf  $(1/3 \cdot t)$  festgelegt, wobei eine szenarioabhängige Verschiebung des Erneuerungszeitpunktes nach vorne oder hinten stattfinden kann, solange der Ansatz über der Mindestnutzungsdauer und

unter der Maximalnutzungsdauer liegt. Nach Möglichkeit sollte zusätzlich die Referenz-Nutzungsdauer nicht überschritten werden. Dieser Entscheidungsspielraum ist im Ereignisbaum visualisiert.

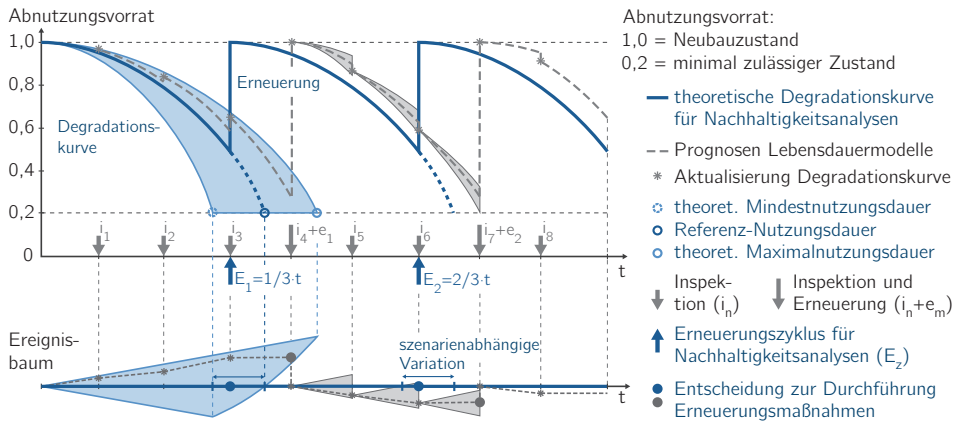


Abbildung 4.2: Qualitative Degradationskurven zur Bestimmung von Erneuerungszyklen für Nachhaltigkeitsanalysen (blau) und Lebensdauermodellen (grau) über den Lebenszyklus  $t$

Im Gegensatz zu Nachhaltigkeitsanalysen, bei denen eine Prognose zum Zeitpunkt  $t=0$  stattfinden muss, werden im Rahmen der Anwendung von Lebensdauermodellen Inspektionen durchgeführt, wodurch der tatsächliche vorhandene Abnutzungsvorrat (graue gestrichelte Kurve in Abbildung 4.2) bestimmt werden kann. Dadurch sind Aktualisierungen der Degradationskurve möglich und der tatsächliche Alterungspfad kann in Intervallen nachvollzogen werden. Hinzu kommt, dass durch die kleineren Analysezeiträume die Unsicherheiten der Prognose reduziert werden. Insgesamt ist im Ereignisbaum erkennbar, dass für Nachhaltigkeitsanalysen nur mittlere theoretische Degradationskurven zur Definition der Instandhaltungsstrategien verwendet werden. Die sich tatsächlich einstellenden Degradationsverläufe können von diesen Annahmen abweichen, d. h. sich besser bzw. schlechter in Bezug auf eine Referenz-Nutzungskurve entwickeln, wobei der tatsächliche Entwicklungspfad ex ante nicht bekannt ist.

Auf Grundlage von theoretischen Nutzungsdauern kann die Definition von Instandhaltungsstrategien erfolgen. Diese können als Szenarien beschrieben werden, die an Instandhaltungszielen ausgerichtet sind. In der deutschen Literatur sind verschiedene Vorschläge für die Systematisierung von Instandhaltungsstrategien zu finden (REICHELT 2006; KLINGENBERGER 2008). Als Gemeinsamkeit lassen sich drei Szenarien identifizieren, mit denen

ein Szenariotrichter aufgespannt werden kann. Die drei Strategien sind mit ihren Zielen und wichtigsten Eigenschaften in Abbildung 4.3 beschrieben. Für jede der drei Instandhaltungsstrategien werden in den folgenden Abschnitten auf Bauteilebene Einzelmaßnahmen definiert, um die jeweiligen Strategieziele abzubilden. Die zustandsbestimmte Instandhaltungsstrategie wird dabei in der deutschen Baupraxis bevorzugt angewendet und zeichnet sich vor allem durch die gegenseitige Abstimmung und die zeitliche Zusammenlegung von Baumaßnahmen zur Minimierung der Eingriffe in den fließenden Verkehr aus. Sie wird in dieser Arbeit als Basisstrategie verwendet.

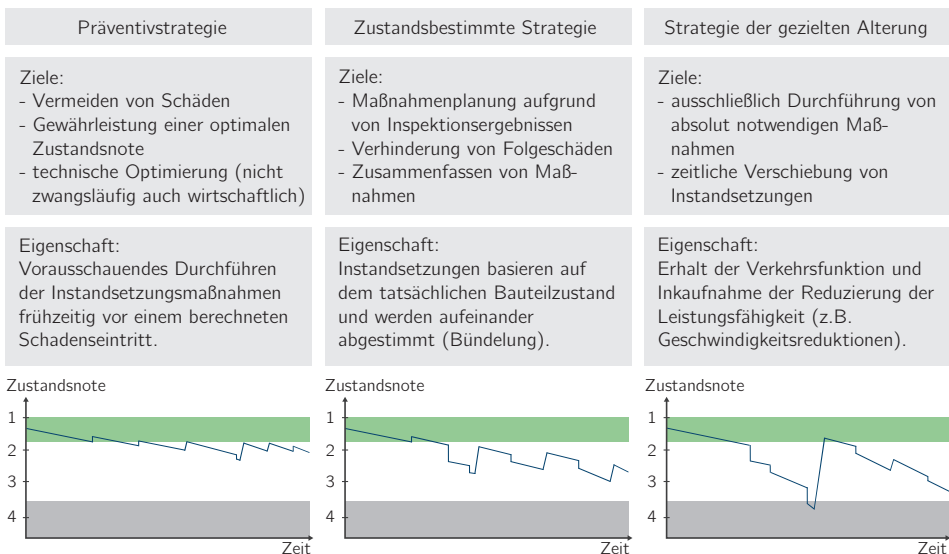


Abbildung 4.3: Ziele, Eigenschaften und qualitativer Verlauf der Bauwerks-Zustandsnote für die drei untersuchten Instandhaltungsstrategien

In Abbildung 4.3 wird die für Straßenbrücken in Deutschland gebräuchliche Zustandsnote verwendet, die sich u. a. aus dem Abnutzungsvorrat der Bauteilgruppen ergibt. In der Zustandsnote werden die drei Aspekte der Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit nach RI-EBW-PRÜF (2013) berücksichtigt und auf Grundlage eines in HAARDT (1999) definierten Algorithmus berechnet. Die RI-EBW-PRÜF (2013) regelt auch die Einteilung der Zustandsnotenbereiche. Vereinfacht kann gesagt werden, dass bis zu einer Zustandsnote von 1,9 ein guter Zustand gegeben ist und keine Instandsetzungsmaßnahmen durchgeführt werden. Ab einer Zustandsnote von 3,5 besteht ein ungenügender Zustand, der eine umgehende Instandsetzung erfordert.

### 4.1.3 Referenz-Nutzungsdaueransätze

Für Brücken existieren in der Literatur verschiedene Ansätze zur Quantifizierung der Referenz-Nutzungsdauer von Brückenbauteilen. Da diese u. a. abhängig von landesspezifischen Bauweisen und Einwirkungen sind, wird hier vor allem auf in Deutschland existierende Angaben eingegangen. Die Mittelwerte und Spannweiten lassen eine erste Einordnung der hier anzusetzenden Referenz-Nutzungsdauern zu. Tabelle 4.1 fasst Literaturwerte für den gesamten Überbau und Unterbau sowie Überbau-Komponenten zusammen. Die Ansätze für den gesamten Unter- bzw. Überbau werden hauptsächlich für die Berechnung von Ablösebeträgen verwendet und liefern in der Regel nur grobe Überschlagswerte. Es ist erkennbar, dass die einzelnen Quellen aufeinander aufbauen. So

Tabelle 4.1: Literaturwerte für Referenz-Nutzungsdauern von Unter- und Überbau sowie weiterer Komponenten des Überbaus

Bauteil bzw. Bauteilgruppe	ABB-Ö (2002)	BMS, Holst (2006)	Ri-Wi-Brü (2007) <sup>2</sup>	ABBV (2010)	Vollrath (2002)	HLSV (2010)
<b>Unterbau</b>						
Unterbau Stahlbeton	110	110	110	110		100
Unterbau Stahl	100			100		
Unterbau Holz	50			50		
<b>Überbau</b>						
Überbau Stahlbeton	70	110		70		100
Überbau Stahl	100	80		100		
Überbau Stahlverbund	70-100	80	70	100		
<b>Rahmentragwerke</b>						
Stahl-/Spannbeton	70			70		
Stahl	100			100		
<b>Überbaukomponenten</b>						
Elastomerlager	20-30 <sup>1</sup>					50
Kalottenlager	20-30 <sup>1</sup>	30				40
Fahrbahnübergänge	20-30 <sup>1</sup>	20			20	25
Kappen	20-30 <sup>1</sup>	25				25
Schutzeinrichtungen	20-30 <sup>1</sup>	30				25
Geländer	20-30 <sup>1</sup>	30				25
Entwässerung	20-30 <sup>1</sup>	30				25

<sup>1</sup> Für die Instandhaltungskostenberechnung findet eine Aufteilung in zwei Gruppen statt: Gruppe C1 mit 30% der gesamten Ausrüstungskosten und einer theoretischen Nutzdauer von 20 Jahren, Gruppe C2 mit 70% der gesamten Ausrüstungskosten und einer theoretischen Nutzdauer von 30 Jahren

<sup>2</sup> Bezugnahme auf die alte Richtlinie zur Berechnung von Ablösungsbeträgen aus dem Jahr 1988, Dokument-Nr. B 6306

sind beispielsweise die österreichische Ablösungsbeträgevereinbarung (ABB-Ö: 2002) und die deutsche Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung (ABBV: 2010) aufeinander abgestimmt. Die Referenz-Nutzungsdauern der meisten Literaturquellen liegen in denselben Größenordnungen.

Für die literaturbasierten Referenz-Nutzungsdauern von Instandsetzungsmaßnahmen für Korrosionsschutzsysteme und bituminöse Deckschichten sowie von Betoninstandsetzungen gibt es, wie in Tabelle 4.2 gezeigt, zwei verschiedene Darstellungsansätze. Zum einen wird „klassisch“ mit festen theoretischen Nutzungsdauern gearbeitet, zum anderen wird vor allem durch VOLLRATH und TATHOFF (2002) eine zeitlich gestaffelte Instandhaltungsstrategie genannt. Dabei unterscheidet sich jeweils der Maßnahmenzyklus und der Grad des Eingriffes. Hierdurch ist eine differenzierte Szenariendefinition möglich.

Tabelle 4.2: Literaturwerte für Referenz-Nutzungsdauern von Korrosionsschutzmaßnahmen und Betoninstandsetzungen sowie Fahrbahnbelägen

Bauteil bzw. Bauteilgruppe	ABB-Ö (2002)	BMS, Holst (2006)	Ri-Wi-Brü (2007)	ABBV (2010)	Vollrath (2002)	HLSV (2010)
<b>Korrosionsschutz</b>						
Vollerneuerung			25 und 45 <sup>1</sup>			35
Vollerneuerung Duplex			40-50			
Teilerneuerung t <sub>1</sub>			15 (7%) <sup>1</sup>		15 (7%) <sup>2</sup>	
Teilerneuerung t <sub>2</sub>			25 (10%) <sup>1</sup>		25 (10%) <sup>2</sup>	
Vollerneuerung t <sub>3</sub>			45 (100%) <sup>1</sup>		45 (100%) <sup>2</sup>	
Ausbesserung			<15 (5%) <sup>1</sup>			
<b>Betoninstandsetzung</b>						
Betoninstandsetzung t <sub>1</sub>					20 (3+10%) <sup>3</sup>	
Betoninstandsetzung t <sub>2</sub>					40 (11+15%) <sup>3</sup>	
Betoninstandsetzung t <sub>3</sub>					60 (18+25%) <sup>3</sup>	
<b>Bituminöse Deckschicht</b>						
Splittmatrixasphalt	17			15		
Gussasphalt	17			25		
Drainasphalt	10			10		
Belagteilerneuerung t <sub>1</sub>		15			10 (12+5%) <sup>4</sup>	25
Belagteilerneuerung t <sub>2</sub>					15 (50+12%) <sup>4</sup>	
Belagsvollerneuerung t <sub>3</sub>					25 (100+50%) <sup>4</sup>	

<sup>1</sup> Werte basieren auf Schröder (2008), die wiederum auf Vollrath (2002) Bezug nimmt, in Klammern ist der Anteil der zu erneuernden Korrosionsschutzfläche angegeben

<sup>2</sup> Prozentangaben in Klammern: Anteil der zu erneuernden Korrosionsschutzfläche

<sup>3</sup> Prozentangaben in Klammern: Anteil der durchzuführenden Betonflächenausbesserung + Betonbeschichtungsfläche

<sup>4</sup> Prozentangaben in Klammern: Anteil der zu erneuernden Deckschicht + Schutzschicht



## 4.2 Realdatenanalyse

### 4.2.1 Datenbank SIB-Bauwerke

Ergänzend zu den existierenden Literaturangaben werden Erhaltungszeiträume für die Bauteilgruppen ermittelt, die auf Realdaten der Datenbank „Straßeninformationsdatenbank – Teilbereich Bauwerke“ der Bast mit dem Datenstand 01.09.2010 fußen (BAST 2011). Die Datenabfrage erfolgte dabei einmal auf Grundlage einer Bauwerksspezifizierung (Brückenlänge, Aufgabe im Netz und Bauart) und zum anderen auf Basis einer Bauteilgruppenspezifizierung (Fahrbahnübergangskonstruktionen und Lager), so dass die Datengrundlage vollständig auf die zu untersuchenden Bauwerkstypen abgestimmt und damit repräsentativ ist. Tabelle 4.3 beinhaltet die Eingangswerte für die Abfragen sowie die Anzahl der für die Auswertungen zur Verfügung stehenden Datensätze.

Tabelle 4.3: Anzahl der zur Auswertung zur Verfügung stehenden Datensätze aus der Datenbank SIB-Bauwerke, Datenstand 01.09.2010

Abfragespezifikation Datenbank SIB-Bauwerke	Anzahl Teilbauwerke		davon Anzahl Datensätze mit Baujahr / Baukosten		Anzahl Instandhaltungsmaßnahmen mit Baujahr	
	Stahlverbund	Stahlbeton	Stahlverbund	Stahlbeton	Stahlverbund	Stahlbeton
Integralbrücke 40-60 m, Autobahn unten	24	52	23	45	56	24
Zweifeld-Balkenbrücke 40-60 m, Autobahn unten	33	1760	30	469	29	1272
Mehrfeld-Hohlkastenbrücke, Stützweite 30-40 m, Bundesstraße oben	4	172	-	102	-	289
Mehrfeldbrücke, Länge > 100 m, Autobahn oben	22	290	6	203	29	892
Verformungslager, Brückenlänge > 100 m	93		59		907	
Stahllamellen-Fahrbahnübergänge, 1-3 Lamellen	218		183		175	

Die geringe Anzahl der Instandsetzungsmaßnahmen für die Integralbauwerke sowie das sich aus der Datenbank ergebende mittlere Baujahr 1999 zeigen, dass diese Konstruktionsart als vergleichsweise jung einzustufen ist und keine ausreichende Basis für eine Auswertung zur Verfügung stellt. Sie wird daher im Folgenden ausgeklammert. Für die restlichen Abfrageklassen steht eine ausreichend große Datenbasis zur Verfügung, allerdings

vorwiegend für Stahlbetonkonstruktionen. Wenn es für die auszuwertende Bauteilgruppe möglich ist, werden deshalb Datensätze für Stahlverbund- und Stahlbetonbauwerke zusammen analysiert.

#### 4.2.2 Datenqualität

Die Datenqualität der Realdaten kann u. a. anhand der auswertbaren Datensätze beurteilt werden. Trotz der teilweise sehr großen in der Datenbank vorhandenen Anzahl an Teilbauwerken ist nur eine begrenzte Anzahl an mit Baujahr und Baukosten hinterlegten Neubaumaßnahmen bzw. mit Baujahr hinterlegten Instandhaltungsmaßnahmen vorhanden. Hierdurch wird die Signifikanz der Auswertungsergebnisse reduziert.

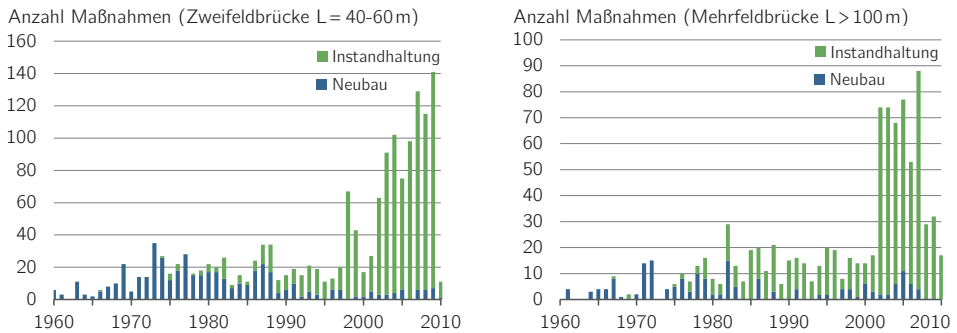


Abbildung 4.4: Verteilung der Anzahl von Neubau- und Instandhaltungsmaßnahmen für Zweifeldbrücken mit  $L = 40\text{-}60\text{ m}$  (links, aus Beck et al. (2013)) und für Mehrfeldbrücken mit  $L > 100\text{ m}$  (rechts) pro Jahr, Datengrundlage SIB-Bauwerke

Die zeitliche Verteilung der Datenbankeinträge differenziert nach Neubau- und Instandhaltungsmaßnahmen ist in Abbildung 4.4 zusammengefasst. Für beide dargestellten Bauwerkstypen sind bis 1985 hauptsächlich Neubaumaßnahmen ausgewiesen, erst um das Jahr 2000 ist eine deutliche Zunahme an Datensätzen zu Instandhaltungen zu verzeichnen. Ein Grund hierfür kann die Zunahme von Instandhaltungsmaßnahmen ca. 20-25 Jahre nach der erhöhten Bauaktivität in den 1970er Jahren sein. Zum anderen könnten Instandhaltungsmaßnahmen erst ab Mitte der 1990er Jahre flächendeckend in der Datenbank erfasst worden sein, da in dieser Zeit auch die Datenbank SIB-Bauwerke entwickelt und aufgesetzt wurde. Auf ein vollständiges, nachträgliches Einpflegen von Instandhaltungen vor dieser Zeit könnte verzichtet worden sein, so dass vor allem vor dem Jahr 1990 durchgeführte Instandhaltungsmaßnahmen nicht erfasst sind.

Des Weiteren wird durch den vergleichsweise kleinen auswertbaren Zeitraum von 40 bis 50 Jahren nur ein Teil des Lebenszyklus abgebildet, eine empirische Aussage über die zweite Hälfte des Brückenlebenszyklus (Jahr 51 bis 100) ist damit nicht möglich. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass die Erhaltungszeiträume auf der vorhandenen Bausubstanz basieren, da die Daten vergangenheitsbezogen sind. Ein heutzutage ggf. existierendes höheres Qualitätsniveau (auf Grundlage des technischen Fortschritts) im Rahmen der Errichtung von Neubauten kann nicht erfasst werden.

Insgesamt muss betont werden, dass die vorliegenden Realdaten die einzige in Deutschland verfügbare Datenbasis darstellen. Durch die konstruktionsspezifischen Abfragen wird eine sehr gute Übereinstimmung der Bauteilgruppenergebnisse mit den tatsächlichen Einbaubedingungen gewährleistet. Die Ergebnisse müssen einzelfallbezogen in Abhängigkeit der Grundgesamtheit und ihrer Ergebnisbandbreite beurteilt werden.

### 4.2.3 Auswertungsmethodik

Die Auswertung erfolgt auf Grundlage des in Abbildung 4.5 dargestellten Auswertungsablaufs. Datensätze für Stahlverbund- und Stahlbetonbauwerke werden wenn möglich zusammengefasst. Es findet keine Durchmischung von Datensätzen der einzelnen Brückenklassen bzw. Lager- und Fahrbahnübergangsabfragen statt.

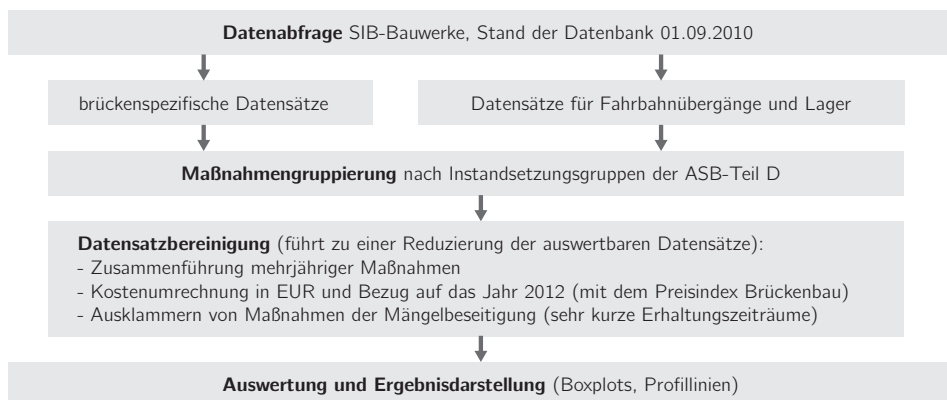


Abbildung 4.5: Angewendeter Auswertungsablauf der Realdatenanalyse zur Darstellung der Erhaltungszeiträume

In der Datenbank SIB-Bauwerke sind alle Maßnahmen auf Grundlage der Gliederung der ASB-ING (2008) klassifiziert. Basierend auf einem Schlüsselkatalog wird eine hierarchi-

sche Gliederung verwendet, wobei eine Aggregation auf die nächsthöhere Ebene möglich ist. Als Beispiel kann für Fahrbahnübergänge die Einteilung in die Gruppen Stahlübergänge, Asphaltübergänge und Teppichübergänge genannt werden. Stahlübergänge werden wiederum in die zwei Gruppen Erneuerung und Instandsetzung unterteilt, wobei die Instandsetzung nochmals vier Untergruppen beinhaltet.

Die einzelnen Maßnahmen werden vor allem hinsichtlich der Erhaltungszeiträume ausgewertet. Die Ergebnisdarstellung erfolgt bevorzugt mit Hilfe von Boxplots, die in Abbildung 4.6 erklärt und deren Lagemaße anhand der Einzeldatensatzverteilung und einer Histogrammdarstellung erläutert werden. Boxplots sind eine etablierte Darstellungsform der deskriptiven Statistik und ermöglichen eine visuelle Interpretation der Verteilung der Erhaltungszeiträume.

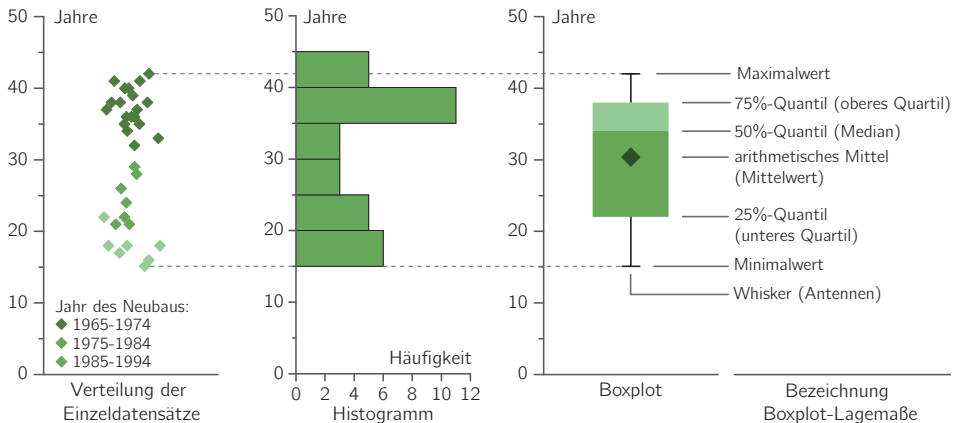


Abbildung 4.6: Zusammenhang zwischen Einzeldatensätzen aus den Abfragen (links, hier am Beispiel der Asphaltübergänge) und dem sich ergebenden Histogramm (Mitte) sowie Boxplot (rechts, mit Erläuterung der Boxplot-Lagemaße)

#### 4.2.4 Ergebnisse Erhaltungszeiträume

Die Auswertungsergebnisse der Erhaltungszeiträume werden beispielhaft an der Bauteilgruppe der Fahrbahnübergangskonstruktionen diskutiert, wobei Zwischenergebnisse bereits in ZINKE und UMMENHOFER (2013) und BECK et al. (2013) veröffentlicht sind. Das baupraktische Vorgehen im Zuge der Erneuerung von Fahrbahnübergängen ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Die vollständigen empirischen Analysen zu allen Bauteilgruppen finden sich mit Deutungen in Anhang C.1 bis C.6.



Abbildung 4.7: Ablauf des Austauschs eines Fahrbahnübergangs, eingebauter Zustand mit abgetragenem Asphalt (oben) und ausgebauter Zustand mit sichtbarer Anschlussbewehrung (unten)

Die Ergebnisse der Datenabfrage zu Zweifeld-Balkenbrücken in Abbildung 4.8 zeigen, dass für Fahrbahnübergänge insgesamt 25 auswertbare Datensätze zur Verfügung stehen, die bei einer Gesamtauswertung einen Median von 28,5 Jahren und einen Mittelwert von 28 Jahren ergeben. Bei getrennter Ausweisung der Maßnahmenarten „Instandsetzung Fahrbahnübergänge“ und „Erneuerung Stahlübergänge“ erhöhen sich Median und Mittelwert für die Erneuerung auf 32,5 Jahre, während Instandsetzungsmaßnahmen deutlich geringere Wert von 25,5 bzw. 24,5 Jahren ergeben.

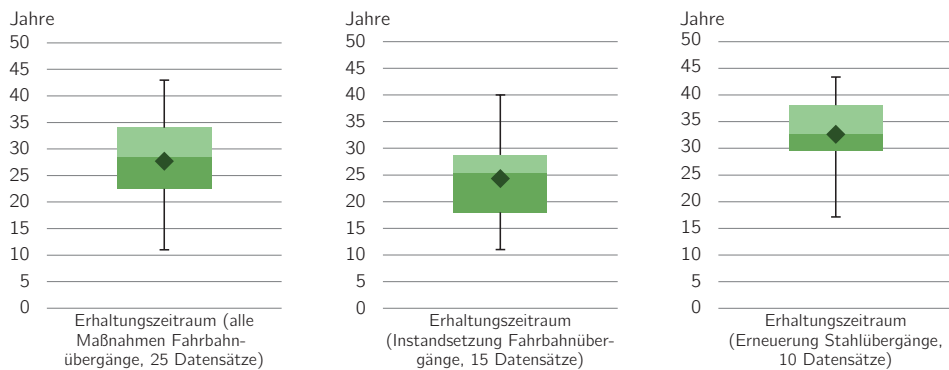


Abbildung 4.8: Erhaltungszurücklagen für Fahrbahnübergangskonstruktionen von Zweifeldbrücken (Gesamtauswertung links) mit Unterteilung in Instandsetzungsmaßnahmen (Mitte) und Erneuerungsmaßnahmen (rechts), aus Zinke und Ummenhofer (2013)

Insgesamt sind Instandsetzungen als Maßnahmen geringeren Umfangs mit einem kleineren Erhaltungszeitraum einzustufen. Bei der Ergebnisdeutung muss berücksichtigt werden, dass das Einpflegen der Daten durch eine Vielzahl an beteiligten Personen in den Landesbehörden unter Umständen nicht einheitlich erfolgte. So existiert eine Instandsetzungsmaßnahme mit einem Maximal-Erhaltungszeitraum von 40 Jahren, die entweder auf ein zweites Instandhaltungsintervall oder die Zuordnung zu einer falschen Maßnahmengruppe zurückzuführen ist. Aufgrund der geringen Datensatzanzahl erfolgt für die Datensätze der Zweifeldbrücke keine Auswertung nach Baujahresklassen, dies wird aber für die separate Datensatzabfrage für Stahllamellen-Fahrbahnübergänge in Abbildung 4.9 durchgeführt.

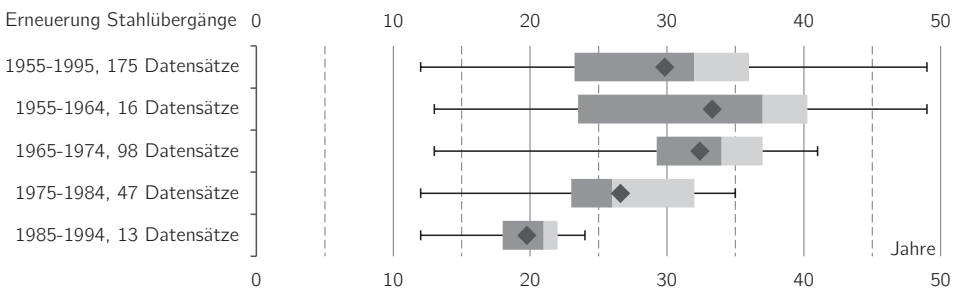


Abbildung 4.9: Erhaltungszeiträume für Stahllamellen-Fahrbahnübergänge mit 1-3 Lamellen, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

Bei der Abfrage für Stahllamellen-Fahrbahnübergänge mit ein bis drei Lamellen liegen insgesamt 178 auswertbare und nicht auf einen Brückentyp abgestimmte Datensätze vor. Die Ergebnisse können aufgrund der großen Grundgesamtheit als signifikant eingestuft werden. Bei der Analyse nach Baujahresklassen zeigt sich eine sukzessive Abnahme der Medianwerte und gleichzeitig ab dem Jahr 1965 auch eine Abnahme der Anzahl der Datensätze. Dies deutet darauf hin, dass bei jüngeren Brückenbaujahren die Anzahl der Bauwerke, bei denen noch kein Austausch der Übergangskonstruktionen stattgefunden hat, größer ist als bei älteren Bauwerken. Auf der anderen Seite existiert eine größere Anzahl an älteren Brückenbauwerken, siehe Abbildung 4.4. Hier zeigt sich das Problem, dass lange Nutzungsdauern dazu führen, dass in der Datenbank kein Eintrag einer Erneuerungsmaßnahme existiert und damit auch keine Berücksichtigung bei der Berechnung der Erhaltungszeiträume stattfinden kann. Es ist davon auszugehen, dass sich durch diese hier nicht erfassten Maßnahmen die Erhaltungszeiträume verlängern.

Des Weiteren kann aus der Datenbank SIB-Bauwerke i. d. R. nicht der genaue Grund für einen Austausch entnommen werden. So können Schäden bzw. Mängel, eine planmäßige

Erneuerung oder der präventive Austausch Beweggründe für eine Maßnahmendurchführung sein. Vorhandene Restnutzungsdauern können daher aus der Datenbankauswertung nicht hervorgehen und sind auch nicht in den Erhaltungszeiträumen berücksichtigt.

Alle Baujahresklassen in Abbildung 4.9 haben gemeinsam, dass die Minimalwerte der Erhaltungszeiträume bei 12-13 Jahren liegen. Auch hier kann nicht ausgeschlossen werden, dass Instandsetzungsmaßnahmen wie der Austausch von Dichtungsprofilen bei der Dateneingabe als Erneuerungsmaßnahmen ausgewiesen wurden. An den Boxplots ist aber zu erkennen, dass diese Minimalwerte das Gesamtergebnis nur bedingt beeinflussen. Die akzeptable Bandbreite zwischen unterem und oberem Quartil ermöglichen eine gute Einschätzung der Erhaltungszeiträume. Lediglich die arithmetischen Mittel werden gegenüber dem Median durch die Minimalwerte teilweise deutlich nach unten geschoben.

Die am Beispiel der Fahrbahnübergangskonstruktionen dargestellten Auswertungen werden für alle Bauteilgruppen durchgeführt. Als vereinfachte Ergebnisdarstellung können, wie in Abbildung 4.10 geschehen, die unteren und oberen Quartile sowie die Mediane für alle Bauteilgruppen ausgewiesen werden. Die Ergebnisse können als Profillinien der jeweiligen Erhaltungszeiträume bezeichnet werden und basieren auf den Analysen in Anhang C.1 bis C.6. Die Anzahl der jeder Profillinie zu Grunde liegenden Datensätze lässt einen Rückschluss auf die Signifikanz der jeweiligen Ergebnisse zu. Bei der Mehrheit der Profillinien ist eine Schrägstrichform zu erkennen, die zeigt, dass ältere Baujahresklassen zu längeren Erhaltungszeiträumen führen. Gleichzeitig nimmt i. d. R. die Anzahl der auswertbaren Datensätze bei jüngeren Baujahresklassen deutlich ab. Daher werden für die Strategieentwicklung vor allem die Baujahre bis 1974 zu Grunde gelegt und auf Ergebnissen mit einer hohen Grundgesamtheit an ausgewerteten Datensätzen aufgebaut.

#### 4.2.5 Strategieentwicklung

Die Ableitung von Instandhaltungsstrategien erfolgt auf Basis der erhobenen Literaturwerte, kombiniert mit den empirisch gewonnenen Erhaltungszeiträumen und ergänzt um Experteneinschätzungen. Dabei wird ein Intervall von 16,6 Jahren verwendet (sechs Lebenszyklusabschnitte), um die Einzelmaßnahmen vor allem für die zustandsbestimmte Instandhaltungsstrategie in ein Grundraster einordnen zu können und eine Maßnahmenkombination zu ermöglichen. Die empirischen Analysen zeigen, dass der Unterschied zwischen den Erhaltungszeiträumen verschiedener Bauwerksarten nicht eindeutig klassifiziert werden kann, daher erfolgt hier *keine* auf verschiedene Bauwerksarten abgestimmte Definition der Instandhaltungsstrategien.

## 4 Brückenlebenszyklus

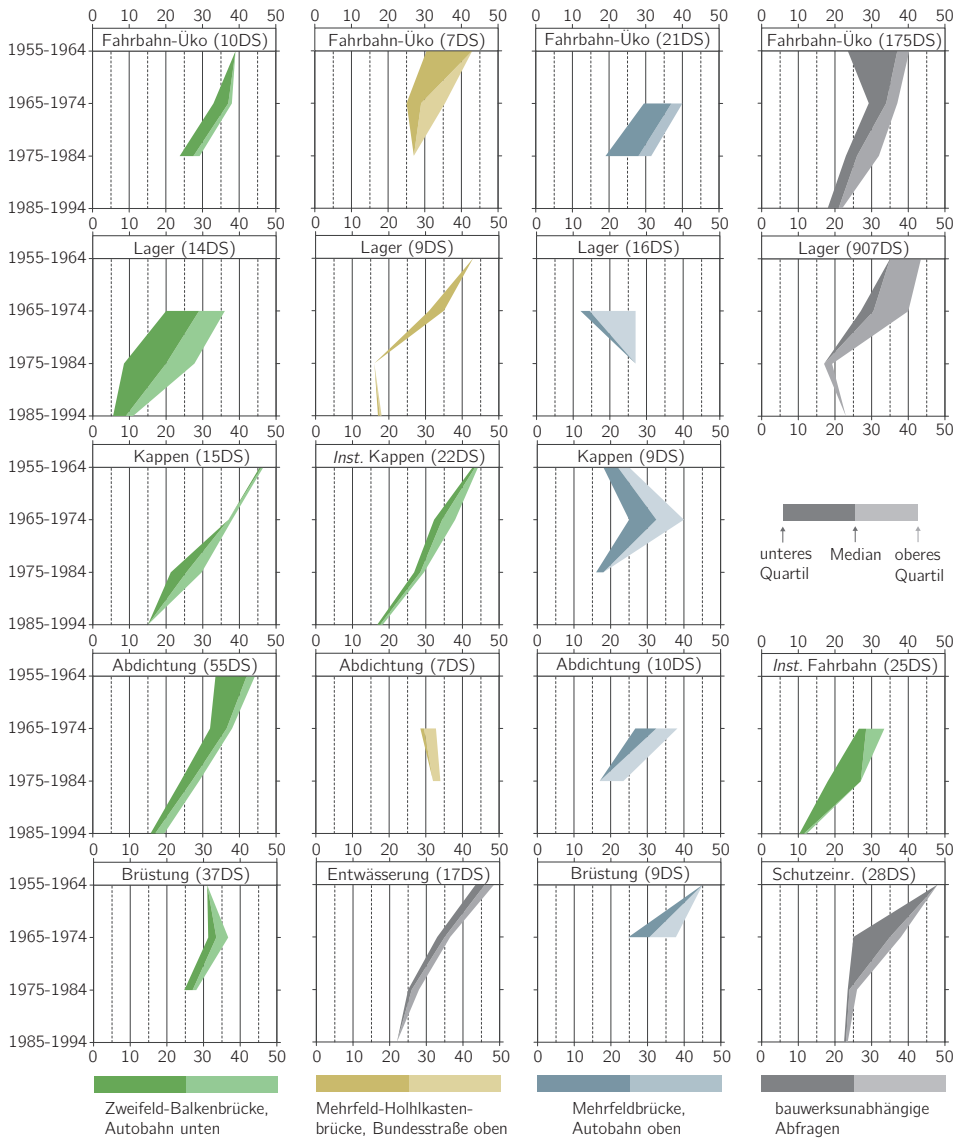
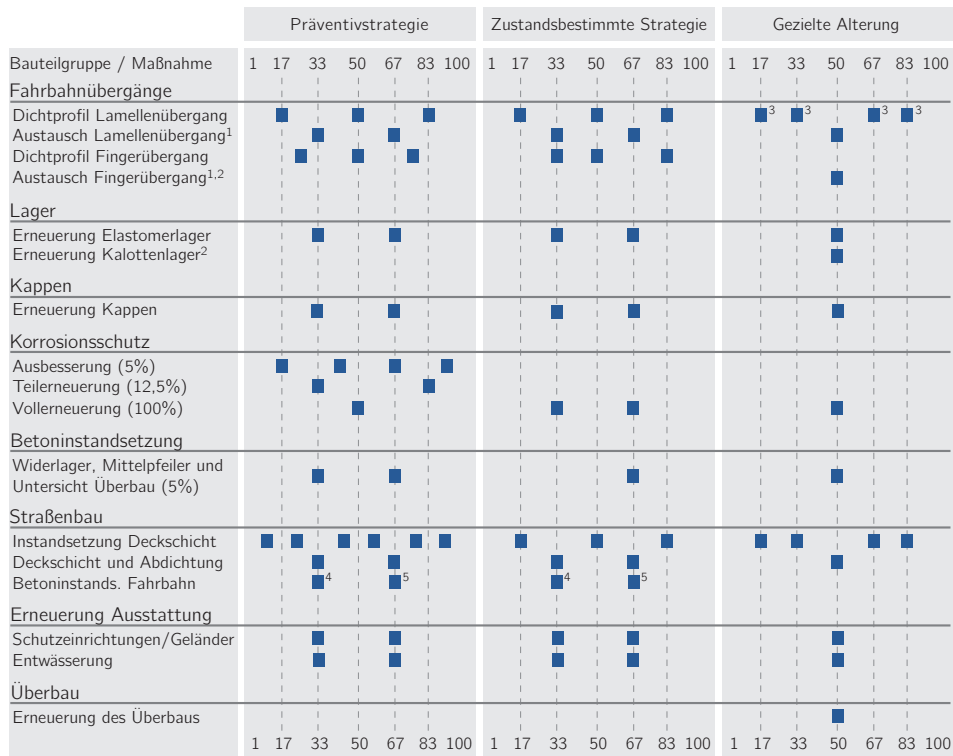


Abbildung 4.10: Profillinien der Erhaltungszeiträume für Erneuerungsmaßnahmen verschiedener Bauteilgruppen (Ergebnisse zu Instandsetzungen an Kappen und Fahrbahnen sind mit *Inst.* markiert), Zusammenfassung auf Grundlage der Boxplotauswertung in Anhang C.1 bis C.6, dargestellt werden das 25-50 % Quantil (dunkle Flächen) und das 50-75 % Quantil (helle Flächen), Unterteilung der Ergebnisse in Baujahresklassen (Ordinate) und Abfragespezifikationen (unterschiedliche Farben), Anzahl der Datensätze (DS) in Klammern



Insbesondere bei den Fahrbahnübergangskonstruktionen und teilweise auch bei den Lagern kann das Festlegen der Erneuerungszyklen nicht vollständig objektiv erfolgen. Sowohl die Literaturwerte (Referenz-Nutzungsdauern zwischen 20 und 30 Jahren) als auch die empirischen Analysen (Erhaltungszeiträume zwischen 25 und 40 Jahren) lassen das Festlegen eines Erneuerungszyklus von Lamellenübergängen von 25 Jahren als auch von 33 Jahren zu. Für die Strategie der zustandsbestimmten Instandhaltung wird davon ausgegangen, dass für Lamellenübergänge bei dem heutigen Stand der Technik jeweils ein Erneuerungszyklus von 33 Jahren erreicht werden kann, wenn eine regelmäßige Erneuerung der Dichtprofile stattfindet. Die festgelegten Erneuerungszyklen aller Bauteilgruppen sind in Abbildung 4.11 für die drei definierten Instandhaltungsstrategien dargestellt.



<sup>1</sup> gesamter Fahrbahnübergang inklusive Dichtprofil      <sup>2</sup> Erneuerungszyklus bei regelmäßiger Instandhaltung: 100 Jahre  
<sup>3</sup> nur für mehrlamellige Fahrbahnübergänge      <sup>4</sup> 20% der Betonoberfläche (3,5 cm tief)  
<sup>5</sup> 40% der Betonfläche (3,5 cm tief)

Abbildung 4.11: Erneuerungs- und Instandhaltungszyklen aller Bauteilgruppen in Abhängigkeit der drei Instandhaltungsstrategien

Die empirischen Analysen zeigen, dass eine präventive Erneuerung von Fahrbahnübergängen nach 25 Jahren zum Erreichen der Ziele der Präventivstrategie geeignet wäre. Hierdurch muss im Vergleich zur zustandsbestimmten Strategie eine zusätzliche Austauschmaßnahme durchgeführt werden, die zu einer deutlichen Erhöhung der Bauaktivitäten führt. Da in dieser Arbeit die Analyse externer Effekte eine zentrale Rolle spielt und vor allem die Vorteilhaftigkeit von Maßnahmenkombinationen der zustandsbestimmten Strategie quantifiziert werden sollen, sollten die Unterschiede zu der Präventivstrategie nicht zu groß sein. Daher wird für Fahrbahnübergänge und Lager auch für die Präventivstrategie ein Erneuerungszyklus von 33 Jahren angesetzt, so dass die Anzahl der Erneuerungszyklen mit denen der zustandsbestimmten Strategie identisch ist.

Die Strategie der gezielten Alterung kann auch als „Verlotterungsstrategie“ bezeichnet werden. Aus diesem Sprachgebrauch geht hervor, dass hier nur absolut notwendige Maßnahmen ausgeführt werden. Unter diesen Randbedingungen wird davon ausgegangen, dass nach der Hälfte des Lebenszyklus eine Erneuerung des kompletten Überbaus stattfinden muss. Dies führt wie in Abbildung 4.11 ersichtlich zu einer großen Gesamtmaßnahme im Jahr 50 des Lebenszyklus und einigen kleineren Maßnahmen im 17-Jahres-Zyklus.

### 4.3 Bauzeiten

#### 4.3.1 Herstellungsphase

Nach der Definition der strategieabhängigen Maßnahmenzeitpunkte im Lebenszyklus müssen zusätzlich die Bauzeiten festgelegt werden. In enger Abhängigkeit zu der Art der Maßnahmen steht auch die erforderliche Verkehrsführung, auf deren Ermittlungsgrundlagen näher in Anhang E.1 eingegangen und die an dieser Stelle definiert wird. Alle Eingangsparameter werden maßnahmengenaу festgelegt, um eine Berechnung mit verschiedenen Methoden zu ermöglichen.

Die Festlegung der Bauzeiten und Verkehrsführungen der Herstellungsphase erfolgt auf Grundlage von Bauzeitenplänen von Referenzbauwerken sowie dem in Deutschland existierenden Bauzeitenkatalog (BZK: 2009). Die fünf in dieser Arbeit untersuchten Referenzbauwerke werden ausführlich in Abschnitt 6.1 vorgestellt. Die in Tabelle 4.4 zusammengestellten Bauzeiten basieren dabei größtenteils auf den Soll-Zeiten der Bauzeitenpläne, die als eine untere Grenze der tatsächlichen Bauzeiten eingeordnet werden können. In allen Fällen liegen die Ist-Zeiten teilweise deutlich über den theoretischen Werten.

Tabelle 4.4: Übersicht der Bauzeiten in der Herstellungsphase und Verkehrsführungen der unten liegenden Autobahn für eine Integralbrücke, Verkehrsführung oben liegend über ein Bestandsbauwerk

Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Wochen-äquivalent [Wochen]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Datengrundlage
Verkehrsführung einrichten	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Erdarbeiten, Spundwände	20	4	5	3+3	Referenzbrücken
Bohrpfähle	10	2		3+3	Referenzbrücken
Fundamente	15	3		3+3	Referenzbrücken
Widerlager	22	5		3+3	Referenzbrücken
Überbau	11	2	2	3+3	Referenzbrücken
Hinterfüllung	11	2	2	3+3	Referenzbrücken
Abdichtung Fahrbahn	5	1		3+3	Bauzeitenkatalog
2 Kappen inkl. Abdichtung	15	3	3	3+3	Bauzeitenkatalog
Fahrbahnbelag, Ausstattung	11	2	3	3+3	Referenzbrücken
Abbruch Bestandsbauwerk	16	3		3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung rückbauen	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Gesamtwochen Herstellung		29	22		

Die Bauzeiten und Autobahn-Verkehrsführungen in Tabelle 4.4 beziehen sich auf eine Integralbrücke mit unten liegender Autobahn, die pro Richtung drei Fahrstreifen besitzt. In der Herstellungsphase wird davon ausgegangen, dass der oben liegende Verkehr über eine Behelfsbrücke oder ein Bestandsbauwerk geführt wird. Die vollständigen Festlegungen zu Bauzeiten und Verkehrsführungen für alle Referenzbauwerke finden sich in Anhang D.1 bis D.3.

#### 4.3.2 Nutzungsphase

Analog zu der Herstellungsphase werden auch für alle Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen in der Nutzungsphase die Bauzeiten und Verkehrsführungen des oben und unten liegenden Sachverhalts definiert. Die Festlegungen basieren dabei auf dem Bauzeitenkatalog (BZK: 2009). Bei nicht in der Richtlinie genannten Maßnahmen findet eine Definition auf Basis von vergleichbaren Aktivitäten statt, für die zu untersuchenden Brücken mit unterschiedlichen Brückenlängen erfolgt eine Skalierung der Bauzeitansätze auf die jeweils vorhandene Brückenlänge.

Die Einzeldauern müssen in einem zweiten Schritt auf zeitgleich auszuführende Aktivitäten überprüft und in Bauwochen umgerechnet werden. Ein Beispiel für eine typische

Maßnahmenkombination, die im Jahr 33 bzw. 66 im Rahmen der zustandsbestimmten Strategie stattfinden würde, ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Durch eine zeitgleiche Ausführung der Einzelmaßnahmen weisen Parallelaktivitäten eine kürzere Dauer als die reine Einzelmaßnahmensumme auf.



Abbildung 4.12: Maßnahmenkombination der Kappenerneuerung, Betoninstandsetzung von Widerlagern und Mittelpfeiler sowie Erneuerung der Fahrbahn des oben liegenden Sachverhalts

Die sich für den gesamten Lebenszyklus ergebenden Bauzeiten und Verkehrsführungen sind für die Integralbrücke und eine Instandhaltungsstrategie in Tabelle 4.5 zusammengefasst. Für alle zu untersuchenden Varianten liegt eine solche Abbildung des Lebenszyklus vor, siehe Anhang D.1 bis D.3, wobei vollständig auf den strategieabhängigen Erneuerungs- und Instandhaltungszyklen der Bauteilgruppen aus Abbildung 4.11 aufgebaut wird.

### 4.3.3 Erhöhungsfaktoren

Alle in den beiden vorherigen Abschnitten definierten Bauzeiten stellen untere Grenzwerte dar, die nach BZK (2009) planmäßig mit Erhöhungsfaktoren multipliziert werden. Diese Faktoren sind monatsabhängige Aufschläge für Tageslichtverfügbarkeit und Schlechtwetterbehinderungen, die teilweise zu einer deutlichen Erhöhung der Grundwerte führen. So wird für den Monat April ein Tageslichtfaktor von 1,1 und ein Schlechtwetterfaktor von 1,12 angesetzt, so dass sich die Bauzeit insgesamt um 23,2% gegenüber dem tabellierten Grundwert erhöht.

Alle deterministischen Berechnungen werden mit den Grundwerten durchgeführt, so dass die Ergebnisse auf einer Mindestbauzeit aufbauen. Im Rahmen der probabilistischen Berechnungen werden die Erhöhungsfaktoren berücksichtigt. Da ex ante allerdings nicht bekannt ist, in welchen Monaten die Baumaßnahmen durchgeführt werden, muss auf ein

Tabelle 4.5: Übersicht der Bauzeiten und Verkehrsführungen des unten und oben liegenden Sachverhalts für den Lebenszyklus einer Integralbrücke und die Strategie der zustandsbestimmten Instandhaltung

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n
17	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
33	Verkehrsführung	2	9	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	26			
	Austausch Schutzeinrichtungen				
	Austausch Deckschicht/Abdichtung				
	Austausch Entwässerung	4,5			
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15			
	Verkehrsführung	10	5	5s+1	1n+1n
50	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
67	Verkehrsführung	2	10	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	26			
	Austausch Schutzeinrichtungen				
	Austausch Deckschicht/Abdichtung				
	Austausch Entwässerung	4,5			
	Verkehrsführung	10			
	Betoninstandsetzung Überbau	10	7	5s+1	1n+1n
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15			
	Betoninstandsetzung Widerlager	12	3	3+3	1n+1n
83	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
100	Rückbau	10	2	3+3 <sup>#</sup>	0+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

# zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

theoretisches Modell zurückgegriffen werden. Im nachfolgenden Kapitel wird zur Berechnung der Verkehrsganglinien eine Repräsentativwoche verwendet, die in HELLMANN et al. (2008) vorgeschlagen und entwickelt wird. Diese setzt sich dabei aus acht Normalbauzeitwochen innerhalb der bevorzugten Ausführungszeit zwischen Anfang März und Mitte November unter Vermeidung der Sommerferien zusammen. Die berücksichtigten Wochen führen dazu, dass jeweils zwei Wochen im April und September und jeweils eine Woche im Mai, Juni, Oktober und November zur Berechnung der Erhöhungsfaktoren herangezogen werden. Mit diesen Monaten werden unter Verwendung der monatsbezogenen Faktoren des BZK (2009) insgesamt acht Erhöhungsfaktoren bestimmt und

als Histogramm mit einer Klassenbreite von 0,1 in Abbildung 4.13 dargestellt. Mit diesen Daten wird ein Distribution Fitting mit der gleichnamigen Toolbox des Programms Matlab, Release 2012a, durchgeführt. Die Ergebnisse sind für drei errechnete Verteilungen dargestellt.

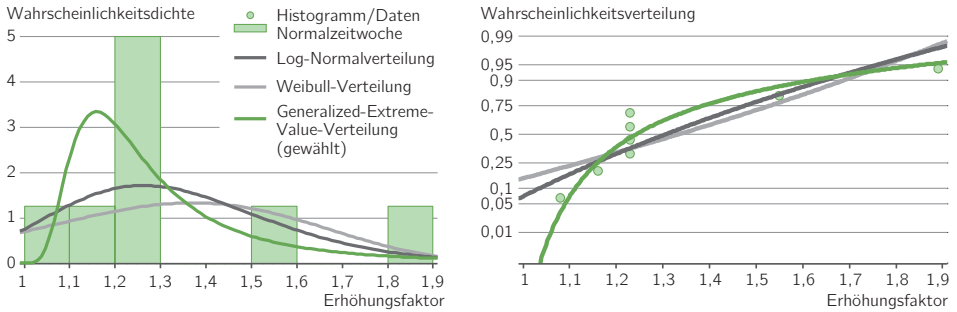


Abbildung 4.13: Distribution Fitting zur Ermittlung einer Verteilungsfunktion zum Abbilden der Bauzeiterhöhung, Histogramm der Eingangsdaten ermittelt für die Repräsentativwoche und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen von drei Verteilungen (links), Wahrscheinlichkeitsverteilung der drei Verteilungen (rechts)

Bei Berechnung der Summe der quadrierten Differenzen zwischen Verteilungs- und Histogrammwerten ergeben sich für alle drei Funktionen in etwa gleiche Ergebnisse, so dass die Verteilungen in Bezug auf die Güte des Fittingergebnisses als nahezu gleichwertig einzuschätzen sind. Die Generalized-Extreme-Value-Verteilung (GEV-Verteilung) bildet die Eingangsdaten bei Analyse der Wahrscheinlichkeitsverteilung (Abbildung 4.13 rechts) vor allem im unteren Bereich besser ab als die beiden anderen Verteilungen. Des Weiteren wird der Maximalwert der Histogrammdarstellung bei Analyse der Wahrscheinlichkeitsdichte (Abbildung 4.13 links) durch die GEV-Verteilung besser getroffen. Die GEV-Verteilung wird mit den Parametern der Lage, Abweichung und Form beschrieben und es wird eine Verteilungsfunktion mit den Parametern  $\mu = 1,19519$ ,  $\sigma = 0,117936$  und  $\xi = 0,389587$  zum Abbilden der Bauzeitenverteilung im Intervall  $[1,0; 1,9]$  im Rahmen der probabilistischen Berechnungen verwendet.

## 5 Modellierung

Auf Grundlage der im letzten Abschnitt dargestellten Parameter zur Abbildung des Brückenlebenszyklus kann eine modellgestützte Berechnung verschiedener Auswirkungen erfolgen. Ein Schwerpunkt wird dabei auf ökonomische und ökologische Auswirkungen gelegt, die wichtige Säulen im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen darstellen. Die Systemgrenzen, verwendeten Eingangsdaten und Datenqualitäten sowie verwendete funktionelle Einheiten werden im Folgenden erläutert.

Für die Bestimmung der durch Brückenbaumaßnahmen induzierten externen Effekte muss eine Berechnung der Verkehrsauswirkungen erfolgen. Dabei ist neben der Bauzeit und Baustellenverkehrsführung eine Vielzahl an streckenbezogenen Parametern für die Höhe der externen Effekte verantwortlich, z. B. der durchschnittliche tägliche Verkehr, der Schwerverkehrsanteil, die Verkehrsganglinien und die Steigung des untersuchten Streckenabschnitts. Um diese verschiedenen Einflussgrößen in einer Parameterstudie untersuchen zu können, wird ein Verkehrsmodell erstellt, das auf die Randbedingungen der Brückenanalyse spezialisiert ist. Das Modell und seine Eingangsparameter werden nachfolgend beschrieben.

### 5.1 Verkehrsmodell

#### 5.1.1 Modellklassifikation

Zur Modellierung von Verkehrsstaus können zwei verschiedene Arten von Modellen zum Einsatz kommen: mikroskopische und makroskopische Modelle. Mikroskopische Modelle bilden den Verkehrsfluss auf Fahrzeugebene ab und berücksichtigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fahrzeugen (BECKMANN und ZACKOR 2001). Da Beschleunigungen, Fahrzeugabstände, Reaktionszeiten etc. fahrzeuggenau berechnet werden, muss eine Vielzahl an Eingangsparametern im Rahmen von mikroskopischen Verkehrsmodellen bekannt sein. Da diese Parameter vor allem für längerfristige Prognosen kaum ausreichend genau zu bestimmen sind und der Modellierungsaufwand sehr hoch ist, ist die Anwend-

barkeit von mikroskopischen Verkehrsmodellen für die Bewertung von Baumaßnahmen nur bedingt gegeben (OBER-SUNDERMEIER 2003).

Da für die hier durchzuführenden Nachhaltigkeitsanalysen eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus erfolgt, können die Eingangsdaten für eine mikroskopische Modellierung nicht mit ausreichender Qualität und Genauigkeit bestimmt werden. Eine Anwendung führte somit zu Scheingenauigkeiten und nicht zu einer Verbesserung der Ergebnisqualität. Daher wird im Folgenden ein makroskopisches Modell verwendet, das mit kollektiven Variablen arbeitet und über eine definierte Zeitdauer konstante Verkehrszustände annimmt (BECKMANN und ZACKOR 2001). Auch im Bereich der makroskopischen Modelle gibt es verschiedene Ansätze, eine Übersicht bietet OBER-SUNDERMEIER (2003). Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Berechnung von Stauwirkungen ein makroskopisches deterministisches Warteschlangenmodell verwendet, das auf Arbeiten von RESSEL (1994) aufbaut und in HELLMANN et al. (2008) im Rahmen der Erarbeitung von Grundlagen für ein Erhaltungsmanagementsystem von Straßen verallgemeinert wird. Die existierenden Ansätze werden auf die Randbedingungen von Brückenbaumaßnahmen angepasst und erweitert. Eine Vorstellung der Modellgrundsätze findet sich im nächsten Abschnitt, eine vollständige Modellerläuterung ist in Anhang E.1 bis E.3 zusammengestellt.

### 5.1.2 Modellierung baustellenbedingter externer Effekte

Alle durchgeführten Untersuchungen weisen externe Effekte aus, die sich, wie in Abschnitt 3.2.1 beschrieben, aus der Differenz zwischen Normalbetrieb und Baustellenbetrieb ergeben. Daher wird im Rahmen des entwickelten Verkehrsmodells immer ein ungestörter Nullfall berechnet und im Anschluss ein zusätzlicher Rechendurchlauf für den Baustellenfall durchgeführt.

Wie in Abbildung 5.1 dargestellt, bauen alle Berechnungen auf der Bestimmung der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Verkehrsführung im Baustellenbereich sowie der vorhandenen Verkehrsnachfrage auf, wobei beide Parameter für jede Baustunde innerhalb des gesamten Brückenlebenszyklus bestimmt werden. Im Anschluss müssen dann zwei Berechnungsfälle unterschieden werden: zum einen die Herabsetzung der Grenzkapazität von Straßen durch die Einrichtung von Baustellen und zum anderen Sperrungen von Straßen, die das Fahren von Umleitungen erfordern. Der letzte Fall führt zu Mehrkilometern in Abhängigkeit der Umleitungslänge sowie der vorhandenen Verkehrsnachfrage. Die entstehenden Zeitverluste, Kraftstoffverbräuche und Emissionen sind vergleichsweise einfach mit einem linearen Modell berechenbar.



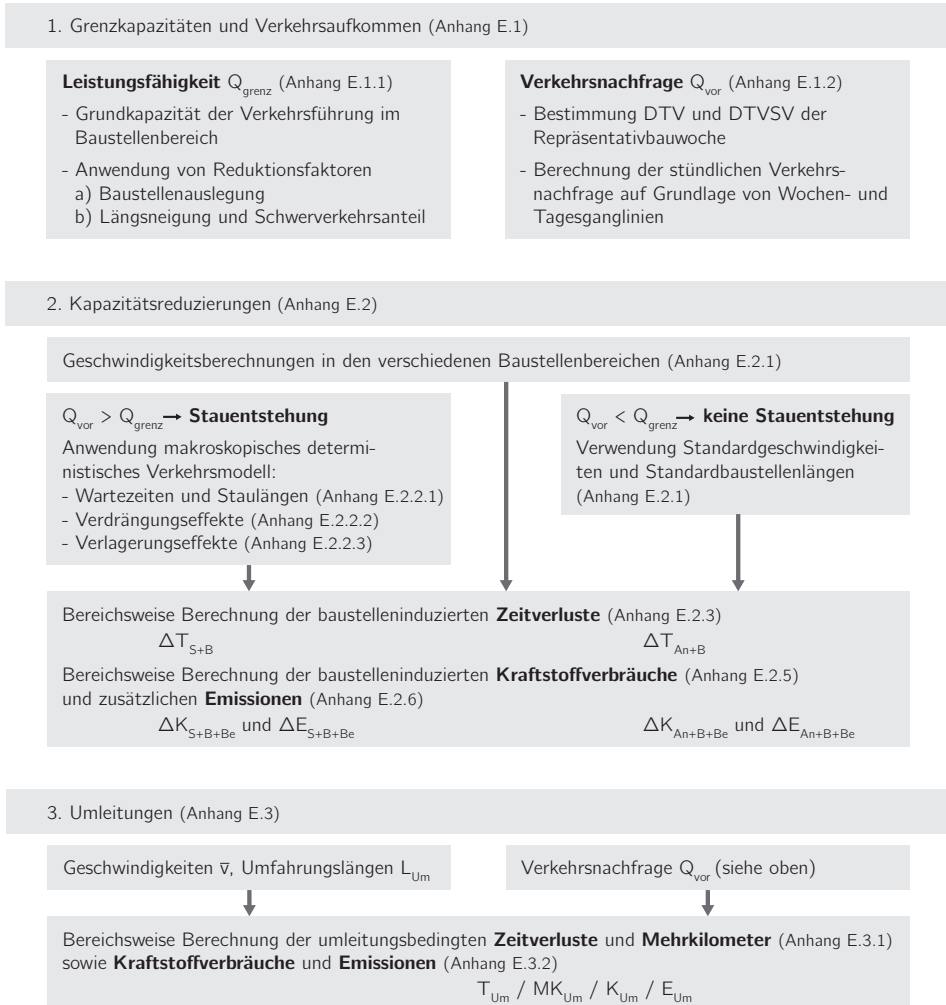


Abbildung 5.1: Berechnungsablauf des Verkehrsmodells zur Bestimmung von durch Brückenbaustellen induzierten externen Effekten

Für den Fall der Kapazitätsreduzierung muss für jede berechnete Stunde zuerst geprüft werden, ob die Verkehrsnachfrage (vorhandene Verkehrsstärke,  $Q_{vor}$ ) unterhalb oder oberhalb der Grenzkapazität  $Q_{grenz}$  der baumaßnahmenabhängigen Verkehrsführung liegt. Wird die Grenzkapazität nicht überschritten, entstehen externe Effekte durch die Geschwindigkeitsreduzierungen im Baustellen- und Annäherungsbereich. Wenn die Grenzkapazität überschritten wird, entstehen externe Effekte durch die Stauentstehung im Baustellenbereich.

pazität im Baustellenbereich in einem Stundenintervall z. B. durch den Wegfall eines Fahrstreifens überschritten wird, sind Verkehrsstaus die Folge. Dies wird in Abbildung 5.2 visualisiert. Die Stauauswirkungen werden mit einem deterministischen makroskopischen Warteschlangenmodell berechnet, das die in einer Stunde den Engpass passierenden Fahrzeuge getrennt nach PKW und Schwerverkehr abbildet und für jede Stunde  $t$  die mittlere Anzahl der im Stau stehenden Fahrzeuge  $\bar{M}_S(t)$  ermittelt. Die Berechnung der Mittelwerte erfolgt auf Basis der jeweils am Stundenanfang und Stundenende im Stau stehenden Fahrzeuge  $M_{S,A}(t)$  und  $M_{S,A}(t + 1)$ . Aufbauend hierauf kann die mittlere Wartezeit der im Stau stehenden Fahrzeuge sowie nach Bestimmung der Verkehrsdichte auch die Warteschlangenlänge berechnet werden.

Zusätzlich werden Verdrängungseffekte in die Berechnungen integriert, die zu einer Verlängerung der Warteschlange führen. Durch die räumliche Ausdehnung der im Staubeereich wartenden Fahrzeuge müssen sich ankommende Fahrzeuge am Ende der Warteschlange einordnen und können nicht direkt zum Baustellenanfang fahren. Als Folge erhöht sich auch die mittlere Anzahl der im Stau wartenden Fahrzeuge, die durch  $\bar{M}_{S, \text{korrr}}(t)$  in die Berechnungen integriert werden.

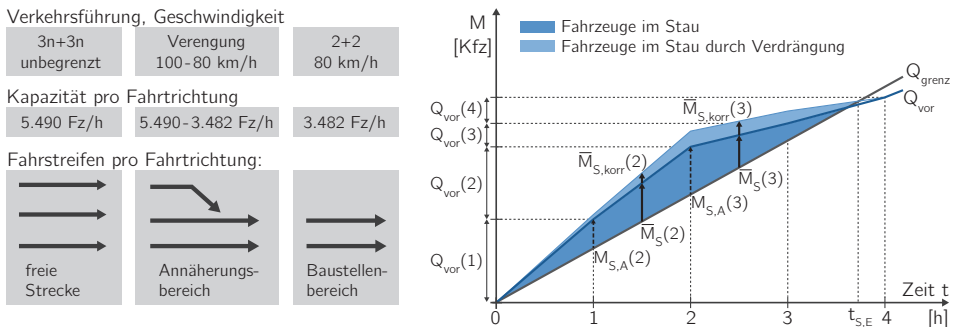


Abbildung 5.2: Herabsetzung der Grenzkapazität bei Wegfall einer Fahrspur (links) und Summenlinie der vorhandenen Verkehrsstärken und maximalen Verkehrsstärken mit der stündlichen Anzahl an Fahrzeugen im Stau (rechts, aufbauend auf Ressel (1994))

Wie Abbildung 5.3 beispielhaft zeigt, wird der Großteil der im letzten Kapitel für Herstellungs- und Instandhaltungsmaßnahmen aufgeführten Verkehrsführungen so gestaltet, dass eine Minimierung der Eingriffe in den Verkehr stattfindet und damit soweit möglich kein Wegfall von Fahrstreifen erfolgt. Auf diese Weise wird – mit Ausnahme des Vorliegens von sehr hohen Verkehrsstärken – für viele Verkehrssituationen die Entstehung von Staus und somit eine exponentielle Steigerung externer Effekte vermieden. Die untersuchten Autobahntypen werden im Folgenden vorgestellt.



Abbildung 5.3: Verengung einer 3-streifigen Autobahn mit einer Verkehrsführung von 3+3 im Baustellenbereich ohne Stauentstehung im Annäherungsbereich

### 5.1.3 Autobahntypen

Das im letzten Abschnitt vorgestellte Verkehrsmodell basiert auf einer Vielzahl von Eingangswerten, die in Abhängigkeit des Bewertungsgegenstandes und -zieles definiert werden müssen. Aufgrund der Parametervielzahl ist eine individuelle und Abhängigkeiten vernachlässigende Analyse nicht zielführend. Hinzu kommt, dass sich je nach untersuchter Verkehrssituation praxisrelevante Bereiche von Parameterkombinationen ergeben, die vorrangig untersucht werden sollten. Um möglichst unterschiedliche Situationen zu erfassen, werden vier Autobahntypen definiert, die als Stellvertreter für im deutschen Autobahnnetz existierende Situationen stehen. Für die vier Autobahntypen wird jeweils eine Beispielausbahn im Großraum München ausgewählt, um hiermit Referenzanwendungen durchzurechnen.

Die vier Autobahntypen mit den gewählten Beispielausbahnen sind in Abbildung 5.4 dargestellt. Die textliche Beschreibung der Autobahncharakteristik spiegelt sich auch in den festgelegten Verkehrsparametern wider. So besitzt die Pendlerautobahn das höchste Verkehrsniveau mit einem DTV von 100.000 Fahrzeugen pro Tag und die typisierten Tagessganglinien bilden die vorhandene Morgen- und Abendspitze ab. In Bezug auf die Wochenganglinie ist der Verkehr von Montag bis Freitag deutlich höher als am Wochenende. Die Wochenendausbahn bildet einen komplett gegensätzlichen Typ mit einem DTV von

30.000 Fahrzeugen pro Tag ab. Hier ergibt sich am Samstag und vor allem am Sonntag ein ausgeprägtes Maximum, die restlichen Wochentage sind eher gering belastet.

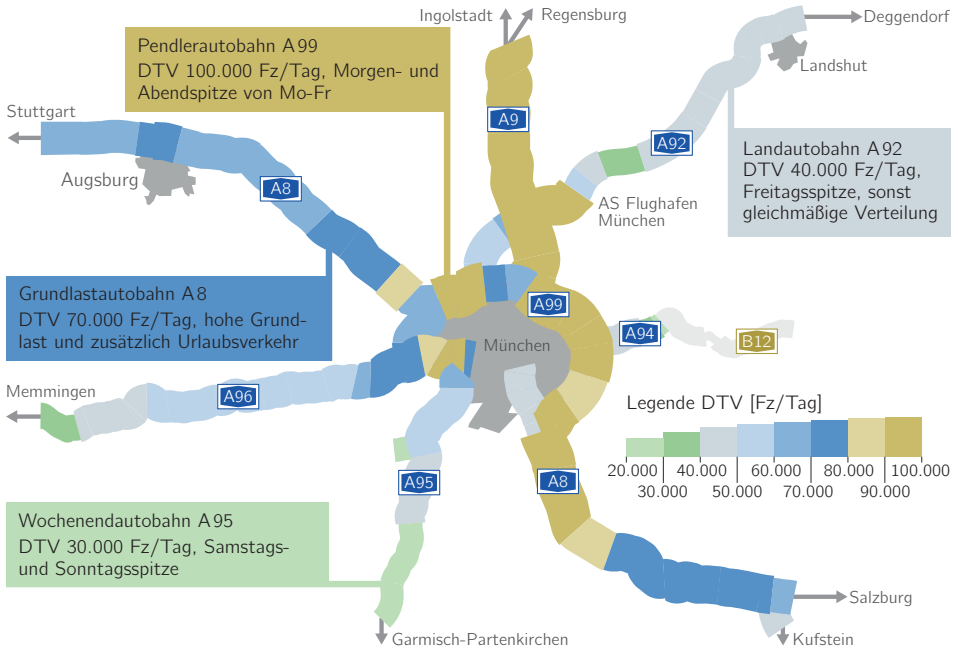


Abbildung 5.4: Definierte Autobahntypen zur Abbildung von für das deutsche Autobahnnetz repräsentativen Verkehrssituationen (Datengrundlage: Autobahndirektion Südbayern (2012))

Für jede der vier definierten Autobahntypen werden alle die jeweilige Situation spezifizierenden Parameter individuell festgelegt. Die Verkehrsstärke sowie der Schwerverkehranteil wird auf Basis der Verkehrsmengenkarte der Autobahndirektion Südbayern für die in Abbildung 5.4 markierten Autobahnabschnitte bestimmt (AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN 2012). Die Pendler- und Grundlastautobahnen besitzen dabei aufgrund des hohen DTV jeweils drei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung sowie eine Geschwindigkeitsbegrenzung. Die Land- und Wochenendautobahnen weisen jeweils zwei Richtungsfahrstreifen auf und es liegt keine Geschwindigkeitsbegrenzung vor. Die verwendeten Eingangswerte sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Die Wochen- und Tagesganglinien werden mit den typisierten Ganglinien von PINKOFKY (2006) beschrieben, wobei die Typenauswahl auf Basis von tatsächlichen Ganglinien erfolgt. Für jeweils eine Woche im Juli 2011 liegt für alle Referenzautobahnen die nach

Fahrt- und Gegenrichtung getrennte tatsächliche Verkehrsnachfrage auf Stundenbasis vor. Sowohl für Wochen- als auch für Tagesganglinien wird die Abweichung zu allen typisierten Ganglinien durch Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt und es wird jeweils diejenige ausgewählt, die in der Summe die kleinsten Abweichungen aufweist. Die Jahresganglinien werden aufbauend auf der in PINKOFSKY (2006) angegebenen textlichen Beschreibung ausgewählt und alle festgelegten Ganglinien sind in Tabelle 5.2 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Verwendete Verkehrsparameter für die unten liegenden Beispielautobahnen und oben liegenden Landes- bzw. Bundesstraßen

Trasse	Beschreibung	DTV [Kfz/Tag]	Schwerverkehr		PKW [Kfz/Tag]	zul. Geschwindigkeit [km/h] und Steigung	Fahrstreifen
			Anteil	[SV/Tag]			
A 99 unten	Pendlerautobahn	100.000	5,0%	5.000	95.000	120 / 0%	6
A 99 Überführung	Bundesstraße	20.000	3,0%	600	19.400	100 / 0%	2
A 8 unten	Grundlastautobahn	70.000	13,6%	9.500	60.500	120 / 0%	6
A 8 Überführung	Landesstraße	6.000	5,3%	320	5.680	100 / 0%	2
A 92 unten	Landautobahn	40.000	9,8%	3.900	36.100	-	4
A 92 Überführung	Landesstraße	6.000	6,7%	400	5.600	100 / 0%	2
A 95 unten	Wochenendautobahn	30.000	3,7%	1.100	28.900	-	4
A 95 Überführung	Landesstraße	4.000	3,8%	150	3.850	100 / 0%	2

Tabelle 5.2: Verwendete typisierte Ganglinien für unten liegende Beispielautobahnen und oben liegende Landes- bzw. Bundesstraßen

Trasse	Beschreibung	JGL	WGL	Tagesganglinien (TGL)					Ø Länge Umleitung [km]
				Mo	Di-Do	Fr	Sa	So	
A 99, Fahrtrichtung	Pendlerautobahn	A	B	A	A	B	A	D	3
A 99, Gegenrichtung	Pendlerautobahn		B	F	F	E	D	B	3
A 99 Überführung	Bundesstraße	A	B	D	D	D	D	D	2
A 8, Fahrtrichtung	Grundlastautobahn	B	B	B	B	B	A	D	4
A 8, Gegenrichtung	Grundlastautobahn		B	E	E	E	D	B	4
A 8, Überführung	Landesstraße	A	B	E	E	E	D	D	3
A 92, Fahrtrichtung	Landautobahn	C	C	D	E	E	C	B	4
A 92, Gegenrichtung	Landautobahn		B	G	B	D	B	D	4
A 92, Überführung	Landesstraße	A	B	E	E	E	C	C	3
A 95, Fahrtrichtung	Wochenendautobahn	D	F	D	E	E	H	G	5
A 95, Gegenrichtung	Wochenendautobahn		F	C	C	E	F	E	5
A 95, Überführung	Landesstraße	A	B	E	E	E	C	C	4

Die Verwendung von typisierten Ganglinien hat den Vorteil, dass evtl. nicht repräsentative Einzelfallbetrachtungen vermieden werden. Darüber hinaus können verschiedene Verkehrssituationen generisch zusammengesetzt werden. Abschließend kann bis zu einem gewissen Grad die Abbildung zukünftiger Verkehrssituationen erfolgen, die auf Basis von vergangenheitsbezogenen Einzeldaten nicht ohne Weiteres abgeleitet werden dürften.

In Tabelle 5.2 sind zusätzlich die durchschnittlichen Umleitungslängen angegeben, die im Fall von Sperrungen zurückgelegt werden müssen. Da im Netz unterschiedliche Routen gewählt werden können, ist eine eindeutige Länge nicht bestimmbar. Die von der Art des Autobahntyps abhängige Länge berücksichtigt allerdings die Tatsache, dass in Ballungsräumen ein engmaschigeres Netz vorhanden ist und damit durchschnittliche Umfahrungslängen kürzer ausfallen als in ländlichen Regionen, in denen weniger Routenalternativen existieren.

Alle genannten Werte beziehen sich auf Sachverhalte, bei denen die Autobahn unterhalb der Brücke liegt. Für Land- und Wochenendautobahnen werden zusätzlich Talbrücken untersucht, bei denen die Autobahn oben liegt. Für diese Fälle werden die in Tabelle 5.1 und 5.2 genannten Eingangswerte analog verwendet, nur mit dem Unterschied, dass kein zweiter Sachverhalt analysiert werden muss und die Umleitungen entfallen, da immer eine Verkehrsführung über einen der insgesamt zwei Überbauten gewährleistet ist.

### 5.1.4 Umsetzung und Einordnung

Sowohl das für die Berechnung von baustelleninduzierten externen Effekten von Brücken entwickelte Verkehrsmodell als auch alle im vorherigen Abschnitt erläuterten Eingangsparameter sind vollständig in die Softwareumgebung Matlab der Firma THE MATHWORKS INC., Release 2012a, implementiert. Hierdurch kann eine stundenbasierte Berechnung und Auswertung aller erforderlichen Parameter erfolgen. Der Programmcode ermöglicht dabei die Berechnung von deterministischen Ergebnissen mit eindeutig festgelegten Eingangsparametern als auch probabilistische Analysen mit streuenden Eingangsparametern. Auf die Analysen unter Unsicherheit wird im Detail in Abschnitt 5.5 eingegangen.

Die entwickelten Modellierungsansätze erfüllen dabei die Anforderungen der neuen RWS (Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen), die sich derzeit in der Erprobungsphase befinden und voraussichtlich im Jahr 2016 eingeführt werden sollen. Sie sollen die EWS (1997) ersetzen und fordern eine Berechnung von Verkehrseffekten auf Stundenbasis. Monetarisierungsfaktoren werden auf Grundlage neuer wissenschaftlicher

Erkenntnisse integriert und Emissionen auf Grundlage des Handbuchs Verkehrsemissionen verwendet (BAIER 2014). Die neuen RWS zielen primär auf die Trassenfindung ab und sind damit ein Instrument zur Durchführung von Kosten-Nutzen-Analysen, die – wie in Abschnitt 3.2.2 diskutiert – im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen nur bedingt eingesetzt werden können. Durch die methodische Übereinstimmung wird allerdings gewährleistet, dass keine Individuallösung entsteht und somit die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze auch mit weiteren deutschen Richtlinien kompatibel sind.

Alle Berechnungen basieren auf dem heutigen Stand der Technik. Da ein sehr langer Brückenlebenszyklus analysiert wird, können zukünftige technische Innovationen eine deutliche Ergebnisbeeinflussung zur Folge haben. So können beispielsweise durch automatisch arbeitende Abstandsassistenzsysteme die Fahrzeugfolgeabstände verkleinert und damit die Grenzkapazitäten von Straßen erhöht werden. Auch eine Veränderung der Antriebstechnik hin zu Elektromotoren hat eine Verschiebung der geschwindigkeitsabhängigen Emissionen zur Folge. Da diese Entwicklungen aus heutiger Sicht nur mit großen Unsicherheiten bewertet werden können, erfolgen die Analysen in dieser Arbeit – wie in der Nachhaltigkeitsbewertung üblich – auf Basis des heutigen Wissensstandes.

## **5.2 Lebenszykluskostenrechnung**

### **5.2.1 Berechnungsmethodik**

Die Lebenszykluskostenrechnung (Life-Cycle-Costing, LCC) ist eine international anerkannte Methode zur Bestimmung aller innerhalb der definierten Systemgrenzen anfallenden Kosten im Lebenszyklus eines Betrachtungsgegenstandes. Für das Bauwesen existieren mit der ISO 15686-5 (2008) und der DIN EN 15643-4 (2012) zwei Normungsdokumente, die vornehmlich auf den Hochbau bezogen sind. Allerdings lassen sich die grundsätzlichen Berechnungsgrundlagen auf Infrastrukturen übertragen. Daher wird im Folgenden auf den Grundsätzen der beiden Normen aufgebaut.

Alle im Lebenszyklus entstehenden Kosten werden auf den Zeitpunkt des Baujahres abgezinst, so dass die sich ergebenden Barwerte die Gesamtkosten in Werten des Bezugsjahres 2012 beschreiben. Auf diese Weise werden Zahlungen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten entstehen, miteinander vergleichbar gemacht. Als reale Diskontierungsrate wird standardmäßig ein Zinssatz von 2 % verwendet, der im Rahmen der Analysen unter Unsicherheit zusätzlich variiert wird. Wie in Abschnitt 4.1.1 festgelegt, werden die Kosten

auf Bauteilgruppenebene bestimmt. Hinzu kommen Kostengruppen, die im Rahmen der Durchführung von Baumaßnahmen erforderlich werden, wie beispielsweise Kosten für Baustelleneinrichtung, Beschilderungen und temporäre Verkehrssicherungen für die Baustellenverkehrsführung sowie Planungskosten. Im Lebenszyklus werden außerdem alle vorgeschriebenen Bauwerksinspektionen abgebildet. Damit lassen sich die Lebenszykluskosten auf Grundlage von Gl. 5.1 berechnen:

$$LZK = K_{He} + K_{VF} + \sum_{BG=1}^N \sum_{a=1}^{A-1} (1+i)^{-a} \cdot [K_{IS,BG} + K_{VF} + K_I] + (1+i)^{-A} \cdot [K_R + K_{VF}] \quad (5.1)$$

mit  $LZK$  = auf den Zeitpunkt  $t = 0$  diskontierte Lebenszykluskosten der gesamten Brücke (Barwert)

$K_{He}$  = Herstellkosten zum Zeitpunkt  $t = 0$  inklusive Kosten für Planung und Baustelleneinrichtung

$K_{VF}$  = Kosten für die Einrichtung, Vorhaltung, ggf. Umbau und Rückbau der maßnahmenabhängigen Verkehrsführung

$K_{IS,BG}$  = Instandhaltungskosten unterteilt nach Bauteilgruppen (inklusive Baustelleneinrichtung)

$K_I$  = Inspektionskosten (Brückenzwischen- und -hauptprüfung)

$K_R$  = Rückbaukosten

$BG$  = einzelne Bauteilgruppen (insgesamt  $N$ -Stück)

$a$  = Zeitpunkt (Jahr) der jeweiligen Instandhaltungsmaßnahme im Lebenszyklus

$A$  = Analysezeitraum (für Brücken 100 Jahre)

$i$  = realer Diskontierungszinssatz (2 %)

Es ist ersichtlich, dass der Lebenszyklus in die drei Phasen der Herstellung, der Nutzung und des Rückbaus unterteilt wird. In diesen Phasen werden alle Kosten integriert, die durch die einzelnen Bauteilgruppen entstehen. Zur Berechnung werden die brückenspezifischen Eingangsdaten verwendet, die in Abbildung 5.5 dargestellt sind. Alle in die Berechnungen eingehenden Bauprozesse und Instandhaltungsmaßnahmen sind auf die jeweils zu untersuchenden Referenzbrücken abgestimmt, so dass repräsentative und anwendungsspezifische Ergebnisse erzeugt werden.



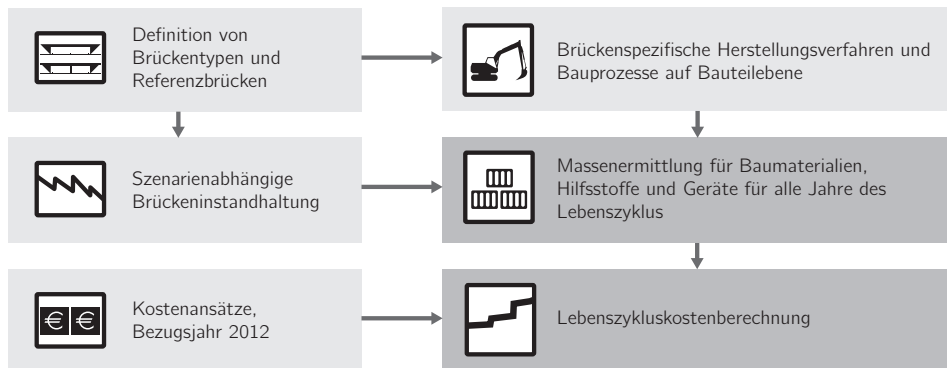


Abbildung 5.5: Berechnungsablauf und verwendete Eingangsparameter zur Bestimmung der Lebenszykluskosten

### 5.2.2 Eingangsdaten und Datenqualität

Für den in Abbildung 5.5 dargestellten Berechnungsablauf werden die Eingangsdaten verwendet, deren Herleitung in den vorherigen Kapiteln zu finden ist. Die Referenzbrücken werden in Abschnitt 6.1 vorgestellt. Alle Eingangswerte bilden die Situation in Deutschland ab und sind nur begrenzt auf andere Länder übertragbar. Da die Massenermittlung und Bauprozessfestlegung auf Werten von ausgeführten Brücken mit vollständigen Planungsunterlagen aufbaut, ist die Eingangsdatenqualität sehr gut.

Auf Grundlage der Massenermittlung und der abgeleiteten Bauzeiten erfolgt unter Verwendung von Baukostenansätzen die Berechnung der Lebenszykluskosten. Die Bestimmung von mittleren Kostenansätzen geschieht auf Basis von vorliegenden Submissionsergebnissen, abgerechneten Beispielprojekten und Literaturwerten. Alle Kosten werden auf das Jahr 2012 unter Anwendung des Baupreisindex für Brücken umgerechnet (DESTATIS 2014). Die Höhe der Kostenansätze ist dabei von einer Vielzahl an Einflüssen abhängig, wie dem Bauort, regionalen Märkten und Konkurrenzsituationen, Transportentfernungen, Ausschreibungsverfahren etc. Soweit möglich sind alle verwendeten Ansätze um diese Einflüsse bereinigt, dennoch sollte die Projektabhängigkeit der absoluten Kosten immer beachtet werden. Da in dieser Arbeit allerdings Variantenvergleiche im Vordergrund stehen, die mit einheitlichen Eingangswerten durchgeführt werden, spielt die absolute Ergebnishöhe eine untergeordnete Rolle. Es findet vielmehr eine Konzentration auf relative Ergebnisunterschiede mit Analyse der Ursachen statt, die aus verschiedenen Konstruktionsvarianten und Instandhaltungsszenarien resultieren. Um eine ggf. existente Ergebnisabhängigkeit von der Höhe der Kostenansätze zu erfassen, wird zusätzlich mit einem

maximalen und minimalen Kostenansatz gearbeitet, die beide auf denselben Grundlagen wie der mittlere Kostenansatz festgelegt werden. Die gesamte Lebenszykluskostenrechnung ist in die Softwareumgebung MS Excel 2013, Version 15, implementiert.

### 5.2.3 Systemgrenzen

Als räumliche Systemgrenze für die Lebenszykluskostenrechnung wird die gesamte Brücke festgelegt. Darin enthalten sind der komplette Überbau inklusive Abdichtung und Straßenbelag sowie der Unterbau mit Gründung, Widerlagerwänden und ggf. Mittelstütze. An das Bauwerk angrenzende Straßenaufbauten sind nicht erfasst. Diese Festlegung entspricht der Bauwerksebene in Abbildung 2.11. Als zeitliche Systemgrenze wird der gesamte Lebenszyklus von der Bauwerkserstellung bis zum Rückbau für den Zeitraum von 100 Jahren definiert. Die Herstellung von Bauprodukten und alle Bauaktivitäten im Rahmen der Bauwerkserstellung sind darin enthalten.

Da in der Lebenszykluskostenrechnung Zahlungsströme analysiert werden, müssen zusätzlich die berücksichtigten Kostenarten abgegrenzt werden. Eine umfassende Definition von Kostenkomponenten stellt der in ISO 15686-5 (2008) eingeführte Begriff der Whole-Life-Costs (WLC) bereit, der die in Abbildung 5.6 abgebildeten Kostenarten subsumiert. Da die auf zweiter Ebene genannten Kostenarten aus sehr unterschiedliche Quellen stammen, wird die Analyse des Ergebnisses deutlich erschwert. Daher werden nur die unter dem Begriff der Lebenszykluskosten genannten Komponenten in die weiteren Analysen integriert, Nicht-Konstruktionskosten und Einnahmen werden nicht berücksichtigt. Externalitäten werden gesondert als Ergebnis der externen Kostenrechnung ausgewiesen. Die unter dem Begriff der Lebenszykluskosten zusammengefassten Kostenarten werden in Tabelle 5.3 im Detail aufgeschlüsselt, dort werden auch die Berechnungsgrundlagen und Pauschalierungen spezifiziert.

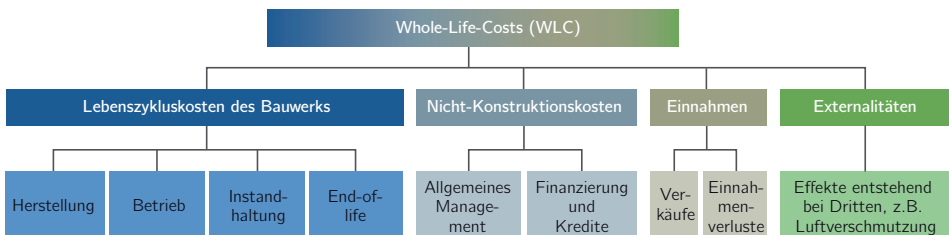


Abbildung 5.6: Whole-Life-Costs nach ISO 15686-5 (2008) mit Unterscheidung verschiedener Kostenarten (2. Ebene) und darin enthaltener Komponenten (3. Ebene)

### 5.2.4 Funktionales Äquivalent

Ein funktionales Äquivalent wird als Vergleichseinheit definiert, auf das die Ergebnisse bezogen werden. Für die Lebenszykluskostenrechnung werden zum einen absolute Zahlen bezogen auf das gesamte Bauwerk ausgegeben. Zum anderen werden auf die Brückenfläche bezogene Ergebnisse ausgewiesen, wobei sich die Brückenfläche aus der Länge zwischen den Brückenwiderlagern multipliziert mit der Überbaubreite errechnet.

Das funktionale Äquivalent spielt in der Lebenszykluskostenrechnung eine untergeordnete Rolle, ist aber von Bedeutung, wenn Ergebnisse verschiedener Nachhaltigkeitsdimensionen oder verschiedene Bauwerke miteinander verglichen werden sollen, um eine einheitliche Vergleichsbasis sicherzustellen.

## 5.3 Ökobilanzierung

### 5.3.1 Berechnungsmethodik

Die Ökobilanzierung (Life-Cycle-Assessment, LCA) ist eine seit dem Jahr 1996 international genormte Methode zur Beurteilung der potentiellen Umweltwirkungen von Produktsystemen während ihres gesamten Lebenszyklus. Die Berechnungsgrundlagen werden von der DIN EN ISO 14040 (2009) und DIN EN ISO 14044 (2006) bereitgestellt, eine auf den Hochbau bezogene Aufbereitung findet sich in DIN EN 15643-2 (2011) und DIN EN 15978 (2012). Eine Übertragung der beschriebenen Grundsätze auf Infrastrukturbauwerke ist nur bedingt möglich, da für Gebäude ein Schwerpunkt auf Energieverbräuche in der Nutzungsphase gelegt wird, der für Infrastrukturen nicht zielführend ist.

Der grundlegende Untersuchungsablauf einer Ökobilanz wird bereits in Abschnitt 3.2.3 beschrieben. In der Phase der Wirkungsabschätzung werden alle potentiellen Wirkungen, die durch das untersuchte Brückenbauwerk verursacht werden, in definierten Wirkungskategorien errechnet. Hier werden die im Bauwesen gebräuchlichen und gut erforschten Wirkungskategorien Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP), Ozonschichtabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP), Ozonbildungspotential (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP), Versauerungspotential (Acidification Potential, AP) und Überdüngungspotential (Eutrophication Potential, EP) sowie die zwei Indikatoren für Ressourceninanspruchnahme des nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfs (PEne) sowie des Gesamtprimärenergiebedarfs (PE) angewendet. Eine Erläu-

terung aller zur Anwendung kommenden Wirkungskategorien und des Primärenergiebedarfs findet sich in Anhang A.3.

Die ökobilanziellen Berechnungen haben zum Ziel, die potentiellen Umweltwirkungen zu quantifizieren und im Anschluss zu deuten. Die Ergebnisse geben dabei nicht direkt messbare Auswirkungen an, sondern weisen potentielle Wirkungen aus, die auch in Zukunft entstehen können (HEIJUNGS und GUINÉE 1993). Die Wirkungsabschätzung wird für alle Wirkungskategorien getrennt durchgeführt und baut auf allen Emissionen und Ressourcen auf, die einen potentiellen Beitrag zu den jeweiligen Wirkungskategorien leisten. Wie in Gl. 5.2 zu sehen ist, werden dabei die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Rückbau unterschieden. Eine weitere Unterteilung des Lebenszyklus in einzelne Module analog zu der DIN EN 15978 (2012) findet nicht statt.

$$WA_{WK} = \sum_{n=1}^N E_{n,H} \cdot c_{E_n,WK} + \sum_{n=1}^N E_{n,N} \cdot c_{E_n,WK} + \sum_{n=1}^N E_{n,R} \cdot c_{E_n,WK} \quad (5.2)$$

mit  $WA_{WK}$  = Wirkungsabschätzung in der jeweiligen Wirkungskategorie

$E_{n,H}$  = Emissionen/Ressourcen in der Herstellungsphase

$E_{n,N}$  = Emissionen/Ressourcen in der Nutzungsphase

$E_{n,R}$  = Emissionen/Ressourcen in der Rückbauphase

$c_{E_n,WK}$  = Charakterisierungsfaktor der jeweiligen Emissionen zur Bestimmung des Beitrags zu der zu berechnenden Wirkungskategorie

Die einzelnen Emissionen werden auf Grundlage einer Energie- und Materialflussanalyse bestimmt, die im Bauwesen auch als Massenermittlung für die einzelnen Baumaßnahmen mit zusätzlicher Quantifizierung der Energieverbräuche bezeichnet wird. Der Berechnungsablauf ist in Abbildung 5.7 visualisiert. Zusätzlich zu den rein bauwerksbezogenen Wirkungen werden zusätzlich externe Effekte aus Verkehrsbeeinflussungen in die Ökobilanz integriert, diese werden allerdings aufgrund ihres unterschiedlichen Ursprungs nicht mit den bauwerksbezogenen Auswirkungen verrechnet. Auf die Modellierung externer Effekte wird im nächsten Abschnitt im Detail eingegangen.

Als Charakterisierungsfaktoren werden Werte des INSTITUTE OF ENVIRONMENTAL SCIENCES (CML) der Universität Leiden verwendet, die in Deutschland auf Basis der DIN EN 15804 (2014) auch für die Erstellung von Umweltproduktdeklarationen von Bauprodukten zu verwenden sind. Der Stand der CML 2001 Charakterisierungsfaktoren ist April 2013.

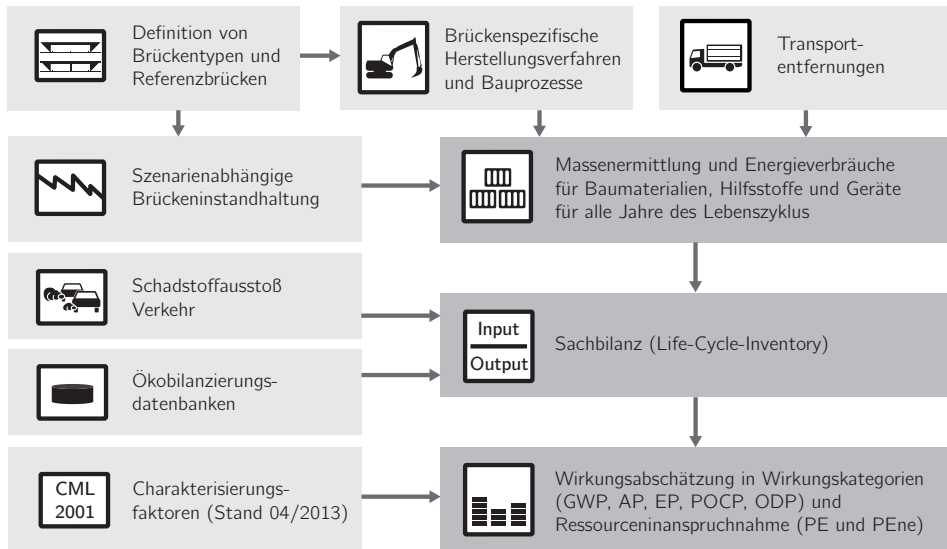


Abbildung 5.7: Berechnungsablauf und verwendete Eingangsparameter im Rahmen der Durchführung der Ökobilanzierung

### 5.3.2 Eingangsdaten und Datenqualität

Wie in Abbildung 5.7 ersichtlich, baut die Ökobilanzierung auf denselben Eingangsdaten für die Referenzbrücken und die Instandhaltungsszenarien auf wie die Lebenszykluskostenrechnung und besitzt damit auch dieselbe sehr gute Eingangsdatenqualität. Für die Transportentfernungen aller Bauprodukte zur Baustelle wird die Annahme einer durchschnittlichen Distanz von 100 km getroffen. Die Energieverbräuche für die Bauprozesse sowie der Einsatz von Hilfsstoffen werden für jede Wirkungskategorie separat abgeschätzt. Dies erfolgt auf Basis von FRIEDRICH et al. (2013) und den damit in Zusammenhang stehenden ökobilanziellen Untersuchungen, die von der Abteilung GANZHEITLICHE BILANZIERUNG der Universität Stuttgart und dem LEHRSTUHL FÜR METALLBAU der Technischen Universität München durchgeführt wurden. Die in die Analysen integrierten Quellen für die Berechnung der Ökobilanzierung sind in Tabelle 5.3 zusammengestellt.

Mit den genannten Eingangsdaten ist die Berechnung der Sachbilanz möglich. Dieser Schritt wird (genauso wie die Wirkungsabschätzung) mit Hilfe der Software GaBi der Firma THINKSTEP AG, Version 6.5, durchgeführt. Als Ökobilanzdatenbank, mit deren Hilfe die Sachbilanzerstellung auf Grundlage der Massenermittlung erfolgt, wird vornehmlich

die GaBi-Baustoffdatenbank, Version 6.110, eingesetzt. Bei fehlenden Datensätzen kommt die Datenbank Ecoinvent, Version 3.1, der gleichnamigen Non-Profit-Organisation aus der Schweiz zur Anwendung. Die GaBi-Baustoffdatenbank baut dabei auf der vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gepflegten Datenbank ÖKOBAUDAT auf und ist auf Konsistenz mit den übrigen Datensätzen geprüft. Des Weiteren sind eine große Anzahl an existierenden Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte integriert.

Tabelle 5.3: Gegenüberstellung der in die Lebenszykluskostenrechnung integrierten Kostenarten bzw. in der Ökobilanzierung berücksichtigten Quellen

Kostenart / Quelle	Lebenszykluskostenrechnung	Ökobilanzierung
Baustoffe bzw. Baumaterialien	vollständig erfasst inkl. Herstellungsprozessen	vollständig erfasst
Hilfsmaterialien (Schalung, Verbrauchsmaterial, Gerüste etc.)	enthalten in Baustoffberechnung und für Gerüste separat berechnet	abgeschätzt
Energieverbrauch der Bauprozesse (Strom, Kraftstoffe)	enthalten in Baustoffberechnung bzw. in Baustelleneinrichtung	abgeschätzt
Transporte (Baumaterialien und Bauprodukte zur Baustelle)	enthalten in Baustoffberechnung	durchschnittliche Transportentfernung zur Baustelle 100 km
Personal	enthalten in Baustoffberechnung	nicht berücksichtigt
Baustelleneinrichtung	vollständig erfasst	abgeschätzt
Verkehrsführung	vollständig erfasst	nicht berücksichtigt
Planung	für Herstellungsphase erfasst auf Grundlage der HOAI	nicht berücksichtigt
Rückbau, End-of-Life	Rückbau pauschal berücksichtigt	Recycling/Entsorgung erfasst
Verwaltung	nicht berücksichtigt	nicht berücksichtigt

### 5.3.3 Systemgrenzen

Die räumlichen Systemgrenzen der Ökobilanz sind mit denen der Lebenszykluskostenrechnung identisch. Als zeitliche Systemgrenze wird ebenfalls der gesamte Brückenlebenszyklus definiert, wobei sämtliche Auswirkungen der Bauproduktherstellung im Vorfeld der Brückenerrichtung miteingeschlossen sind.

Die Phase des Rückbaus ist in der Ökobilanzierung treffender als End-of-Life (EoL) zu bezeichnen, da in dieser Phase Entsorgung und Recycling aller Baumaterialien sowie die dazugehörigen Prozesse miterfasst werden. Die Berechnung der potentiellen Wirkungen erfolgt auf Grundlage von EoL-Datensätzen der oben genannten Datenbanken.

### 5.3.4 Funktionales Äquivalent

Im Rahmen der Durchführung von Ökobilanzen wird i. d. R. der Begriff der funktionellen Einheit auf Basis der DIN EN ISO 14040 (2009) verwendet. Der hier verwendete Begriff des funktionalen Äquivalents basiert auf der ISO 21931-1 (2010). Diese Norm ist auch Grundlage für die in den deutschen Normen zur Nachhaltigkeit von Bauwerken angewendeten Definitionen. Die Definitionen beider Begriffe decken sich weitestgehend und im Weiteren wird ausschließlich der Ausdruck des funktionalen Äquivalents benutzt.

Im Gegensatz zu Hochbauten, bei denen i. d. R. ein Bezug auf  $m^2$ -Nutzfläche stattfindet, ist das funktionale Äquivalent für Brücken nicht eindeutig definiert. Eine Diskussion unterschiedlicher Möglichkeiten mit Vor- und Nachteilen findet sich in ZINKE et al. (2010). Da in dieser Arbeit Vergleiche von Brücken mit derselben Aufgabe im Netz im Vordergrund stehen, spielt das gewählte funktionale Äquivalent eine untergeordnete Rolle. Es wird daher analog zu der Lebenszykluskostenrechnung auf die Brückenfläche zurückgegriffen, allerdings zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit anderen Studien zusätzlich multipliziert mit der Lebensdauer von 100 Jahren, so dass sich für die Darstellung von Ökobilanzergebnissen ein funktionales Äquivalent mit der Einheit [ $m^2 \cdot a$ ] ergibt.

## 5.4 Externe Kostenrechnung

### 5.4.1 Berechnungsmethodik

Die Grundlagen der externen Kostenrechnung und bestehende Berechnungsansätze sind bereits in Kapitel 3 beschrieben. Aufbauend auf den in Abschnitt 4.3 festgelegten baumaßnahmenabhängigen Bauzeiten und Verkehrsführungen kann durch Anwendung des Verkehrsmodells aus Abschnitt 5.1 die Berechnung der baustelleninduzierten externen Effekte erfolgen. Durch Monetarisierung dieser Effekte können die gesamten externen Kosten für alle Jahre des Lebenszyklus berechnet werden. Für alle externen Kostenarten, für die ein eigener Monetarisierungsansatz festgelegt ist, muss dabei die Berechnung des zu Grunde liegenden externen Effekts einzeln erfolgen.

Gl. 5.3 fasst die verschiedenen externen Effekte für jedes Jahr des Lebenszyklus zusammen. Dabei kann eine Summierung für die Phasen der Herstellung, Nutzung und des Rückbaus erfolgen. Ein alternativer Weg zum Umgang mit den externen Umwelteffekten ist die Integration der jährlichen Emissionen in die ökobilanziellen Berechnungen.

Dies erfolgt, indem die einzelnen Schadstoffe entsprechend ihres potentiellen Beitrags zu den Wirkungskategorien anhand von Charakterisierungsfaktoren zugeordnet werden. Im Rahmen der Analysen dieser Arbeit werden beide Alternativen angewendet, um Ergebnisunterschiede aufzuzeigen und methodische Empfehlungen geben zu können.

$$\begin{aligned}
 EK_{LZ} = \sum_{a=1}^A & \left[ (T_{a,PKW} \cdot m_{T,PKW}) + (T_{a,SV} \cdot m_{T,SV}) \right. \\
 & + (MK_{a,PKW} \cdot m_{B,PKW}) + (MK_{a,SV} \cdot m_{B,SV}) \\
 & + (K_{a,Benzin} \cdot m_{K=Benzin}) + (K_{a,Diesel} \cdot m_{K=Diesel}) \\
 & \left. + \sum_{s=1}^S (E_{a,s} \cdot m_s) \right]
 \end{aligned} \tag{5.3}$$

mit  $EK_{LZ}$  = Externe Kosten im gesamten Lebenszyklus

$a$  = Jahr im Brückenlebenszyklus

$A$  = Analysezeitraum (für Brücken 100 Jahre)

$T_a$  = jährliche Zeitverluste getrennt für PKW und SV

$m_T$  = Monetarisierungsansatz Zeitverluste für PKW/SV

$MK_a$  = jährliche Mehrkilometer getrennt für PKW und SV

$m_B$  = kilometerbezogene Betriebskosten PKW/SV

$K_a$  = jährliche Kraftstoffverbräuche getrennt für Benzin und Diesel

$m_K$  = Kraftstoffkosten pro Bezugseinheit

$s$  = in Anhang E.2.6 spezifizierte Schadstoffe aus Kraftstoffverbrennung

$E_{a,s}$  = jährliche Emissionen getrennt nach Schadstoffen

$m_s$  = Monetarisierungsansatz der einzelnen Schadstoffe

Aus Gl. 5.3 ist ersichtlich, dass wie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben keine Diskontierung der externen Kosten stattfindet. Ein Grund hierfür ist die Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen der Integration der externen Umwelteffekte in die ökobilanziellen Berechnungen, bei denen ebenfalls keine Diskontierung vorgenommen wird.

Der gesamte Berechnungsablauf ist in Abbildung 5.8 zusammengefasst. Die Art der Baumaßnahmen ist dabei von der Referenzbrücke bzw. von der Instandhaltungsstrategie abhängig. Sie bauen auf denselben Annahmen auf, die auch für die Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung angesetzt werden, so dass alle drei Methoden zusammen als integrale Berechnungsmethodik charakterisiert werden können.



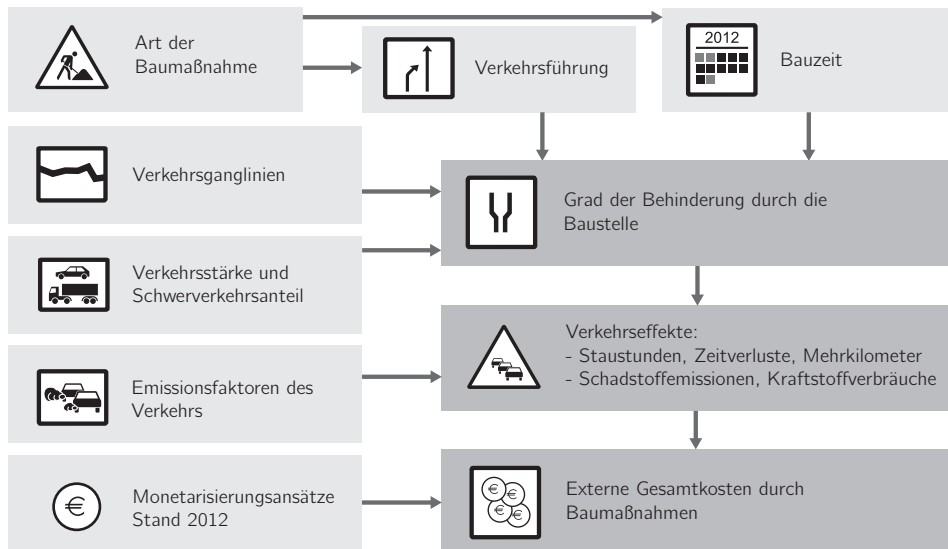


Abbildung 5.8: Berechnungsablauf und verwendete Eingangsparameter im Rahmen der Durchführung der externen Kostenrechnung

### 5.4.2 Eingangsdaten und Datenqualität

Alle verwendeten Eingangsdaten sind so festgelegt, dass sie für Deutschland repräsentative Ergebnisse erzeugen. Eine weitere Regionalisierung (z. B. durch Monetarisierungsansätze ausgerichtet auf die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit einer Kommune oder eine regional unterschiedliche Zusammensetzung der Verkehrsflotte) wird nicht vorgenommen, kann aber durch Anpassung der Eingangsparameter erfolgen, da alle Attribute und ihre Abhängigkeiten in Modellen abgebildet sind.

Die für die externe Kostenrechnung verwendeten Eingangsdaten unterliegen sehr großen Unsicherheiten, die teilweise durch Definition von Parameterspannbreiten quantifiziert werden. Diese Unsicherheiten werden im Rahmen der probabilistischen Berechnungen quantifiziert, so dass eine Beurteilung der Ergebnisbandbreiten möglich ist.

### 5.4.3 Systemgrenzen und funktionales Äquivalent

Die Systemgrenzen für die externe Kostenrechnung sind im Vergleich zur Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung erweitert. Die an die Brücke angrenzenden Straßen

(oben und unten liegender Sachverhalt) werden dabei vollständig in dem Berechnungsmodell abgebildet. Weitere Auswirkungen auf das Verkehrsnetz werden nur im Rahmen von Verkehrsverlagerungen ab einer Staulänge von 3 km und durch Umleitungslängen im Fall von Sperrungen berücksichtigt, siehe Verkehrsmodell in Anhang E.2.2.3 und E.3.

Zusätzlich werden für die Berechnung der externen Umwelteffekte die Vorketten der Kraftstoffbereitstellung berücksichtigt. Hierin erfasst sind alle Emissionen und Energieverbräuche, die bis zum Verkauf von Benzin und Diesel an den Endkunden anfallen. Externe Umwelteffekte entstehend aus anteiligen Auswirkungen der Fahrzeugherstellung werden nicht berücksichtigt.

Die Bezugseinheit der Ergebnisse wird auf Grundlage der jeweiligen Vergleichskategorie ausgewählt. Für den Fall des Vergleichs mit Ergebnissen der Lebenszykluskostenrechnung werden als funktionales Äquivalent absolute Ergebnisse pro Brücke verwendet, für den Fall der Integration in die ökobilanziellen Ergebnisse findet ein Bezug auf die Brückenfläche und die Lebensdauer [ $m^2 \cdot a$ ] statt.

## 5.5 Unsicherheiten

### 5.5.1 Grundlagen

Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten findet bei Nachhaltigkeitsbewertungssystemen, die für eine praktische Anwendung konzipiert sind, i. d. R. nicht statt. Im Rahmen von wissenschaftlichen Untersuchungen gewinnen Unsicherheitsanalysen hingegen immer mehr an Bedeutung. Am häufigsten werden Unsicherheiten im Rahmen der zuverlässigkeitsorientierten Modellierung von Degradationsprozessen untersucht (FRANGOPOLO 2011; SCHNETGÖKE 2008), zunehmend werden aber auch Nachhaltigkeitsbewertungsmethoden wie die Ökobilanzierung mit Unsicherheitsanalysen kombiniert (GERVÁSIO und SILVA 2012; LÜTZKENDORF et al. 2012).

Im Ingenieurwesen ist die Einteilung von Unsicherheiten in die zwei Klassen der statistischen Unsicherheit (Streuung der verwendeten Parameter) und der epistemischen Unsicherheit (fehlende Kenntnisse tatsächlicher Zusammenhänge) üblich (ANG und TANG 2007). Letztere werden auch Modellunsicherheiten genannt und resultieren aus der vereinfachten Abbildung der Wirklichkeit in einem Modell. THOMAS (2009) nimmt eine feinere Unterteilung vor allem bezüglich der Unsicherheit von Daten vor und verwendet hierzu den Begriff der Unschärfe, die u. a. aus der begrenzten Verarbeitungsfähigkeit des

Menschen beim Vorliegen komplexer Probleme und der Ungenauigkeit der menschlichen Sprache resultiert. Im Weiteren wird der Analyseschwerpunkt auf statistische Unsicherheiten gelegt, die mögliche zukünftige Umweltzustände beschreiben, wobei nicht bekannt ist, welcher der Zustände tatsächlich eintritt. Dieser Sachverhalt wird im Rahmen der Entscheidungstheorie auch als Entscheidung unter Risiko charakterisiert (THOMAS 2009).

Eine wichtige Rolle im Rahmen von Unsicherheitsanalysen spielt die Weise, wie Unsicherheiten in den Untersuchungen abgebildet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden drei unterschiedliche Herangehensweisen angewendet:

- *Festlegung deterministischer Werte:* Für unsichere Parameter wird ein fester Wert in den Analysen verwendet, der beispielsweise auf Grundlage von Normen bestimmt wird. Angewendet wird dieser Ansatz z. B. bei der Festlegung der Dauer des Lebenszyklus, der auf Grundlage deutscher Normen mit 100 Jahren angesetzt und nicht variiert wird.
- *Definition von Szenarien:* Mögliche Ausprägungen von Parametern werden mit mindestens zwei Szenarien beschrieben, so dass ein Szenariotrichter aufgespannt wird, der einen Ergebnisraum beschreibt. Der Vorteil der Durchführung von Szenarioanalysen liegt darin, dass mehrere Parameter – wie alle Lebensdauern der einzelnen Bauteile einer Brücke – auf die Zieldefinition eines Szenarios ausgerichtet werden können. Angewendet wird dies beispielsweise bei der Implementierung von verschiedenen Instandhaltungsszenarien.
- *Abilden der Parameterstreuung in Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen:* Eingangsparameter werden mit Hilfe einer Verteilungsfunktion beschrieben, wie dies z. B. für die Monetarisierungsansätze für externe Effekte durchgeführt wird. Diese Verteilungen finden dann Eingang in numerische Berechnungsverfahren.

### 5.5.2 Analysemethoden

Die drei genannten Herangehensweisen erfordern jeweils unterschiedliche Analysemethoden. Daher wird bei der Ergebnisaufbereitung zwischen deterministischen und probabilistischen Berechnungen unterschieden. Deterministische Analysen verwenden feste Eingangsparameter, die nur bei Anwendung verschiedener Szenariodefinitionen variiert werden. Die probabilistischen Berechnungen bauen auf demselben Berechnungsmodell wie die deterministischen Analysen auf, verwenden aber für die Eingangsparameter de-

finierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen. Sie sind somit in der Lage, Gesamteffekte aufzuzeigen und Einflüsse einzelner Parameter auf das Gesamtergebnis darzustellen.

Im Folgenden findet eine kurze Einführung in die drei Methoden statt, mit denen Unsicherheiten in dieser Arbeit analysiert werden. Es handelt sich dabei um Szenarioanalysen, Monte-Carlo-Simulationen und Sensitivitätsanalysen.

### 5.5.2.1 Szenarioanalysen

Im Rahmen von Szenarioanalysen können vielfältige Fragestellungen untersucht werden. Vor allem lässt sich die Auswirkung von unterschiedlichen Berechnungsparametern über den gesamten Lebenszyklus abbilden, wie z. B. bei Verwendung verschiedener Diskontierungsfaktoren oder unterschiedlicher Verkehrsnachfragen.

In dieser Arbeit werden Szenarien vor allem für die Definition von drei verschiedenen Instandhaltungsstrategien und von vier verschiedenen Autobahntypen verwendet. Auch die im nächsten Kapitel vorgestellten Brückentypen bilden Szenarien für verschiedene Entwurfsvarianten ab, die u. a. zur Beurteilung der konstruktionstypenabhängigen Bauzeit verwendet werden können. Hohe Vorfertigungsgrade einer integralen Stahlverbundbrücke ermöglichen dabei kurze Bauzeiten, während eine mit Ortbeton auf einem Lehrgerüst hergestellte Stahlbetonbrücke zu vergleichsweise langen Bauzeiten führt.

### 5.5.2.2 Monte-Carlo-Simulationen

Monte-Carlo-Simulationen werden unter dem Oberbegriff der Monte-Carlo-Methode zusammengefasst und sind wiederholt durchgeführte Berechnungen unter Verwendung von generierten Zufallszahlen. Sie sind damit numerische Verfahren und werden auch als Methode der statistischen Versuche oder als stochastische Prozesse bezeichnet (KALOS und WHITLOCK 2008). Dabei wird dasselbe Berechnungsmodell wiederholt mit unterschiedlichen Eingangsparametern durchlaufen, so dass sich nach dem Gesetz großer Zahlen ein arithmetischer Mittelwert ergibt, der mit hoher Wahrscheinlichkeit dem tatsächlichen Mittelwert entspricht (FAHRMEIR et al. 2007). Gleichzeitig wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ergebnisse erzeugt, die zur Beurteilung von Ergebnisbandbreiten verwendet werden kann.

Die Generierung von Zufallszahlen zur Abbildung der stochastischen Verteilungen der Eingangsparameter besitzt dabei eine große Bedeutung und kann aus computertechni-

scher Sicht umfassend diskutiert werden (PRESS et al. 1992). Die Generierung der Zufallszahlen wird hier in der Softwareumgebung Matlab, Release 2012a, durchgeführt und es wird der dort hinterlegte Pseudozufallszahlengenerator Mersenne-Twister verwendet, der mit einer Wiederholungsperiode von  $(2^{19937} - 1)$  sehr gute Ergebnisse für Pseudozufallszahlen liefert (MATSUMOTO und NISHIMURA 1998). Des Weiteren werden zur Berechnung der Ergebnisse  $10^5$  Simulationsschritte durchgeführt. Die Konvergenz des verwendeten Berechnungsmodells ist in Abschnitt 6.3.1.5 nachgewiesen.

Der Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation ist in Abbildung 5.9 visualisiert. Nach der Definition der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der Eingangsparameter werden Zufallszahlen erzeugt und unter Verwendung der inversen Funktionen auf die gewünschten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen angepasst. Als Ergebnis bildet die Histogrammdarstellung der generierten Zahlen den Verlauf der vorgegebenen Verteilung ab. Im Anschluss wird mit diesen Parametern die Zielgleichung insgesamt N-mal durchlaufen und das Ergebnis wiederum als Histogramm dargestellt. Die als Eingangsparameter verwendete Bauzeitverteilung für jede Maßnahme  $BZV_M$  wird in Abschnitt 4.3.3 abgeleitet, die Monetarisierungsansätze  $m_{x1...xn}$  finden sich in Abschnitt 3.3.9 und die angesetzten Standardnormalverteilungen für maßnahmenabhängige Verkehrseffekte  $EE_{M,x1...xn}$  werden in Anhang E.2.7 und E.3.3 beschrieben.

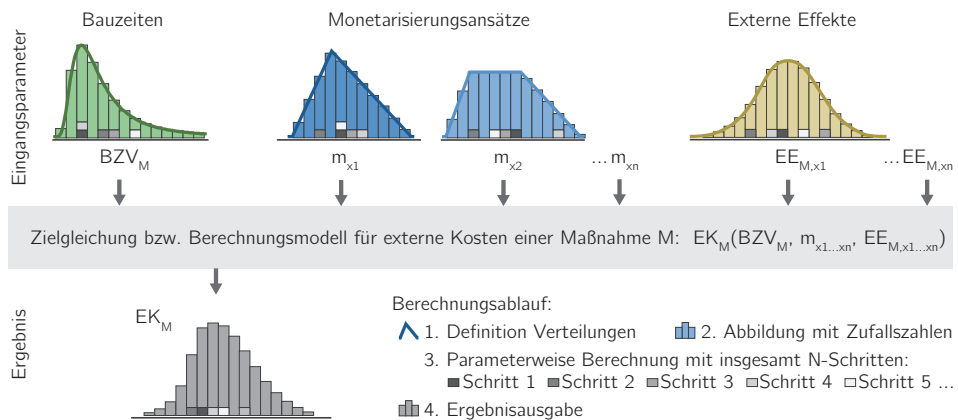


Abbildung 5.9: Visualisierung des Berechnungsablaufs zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation mit insgesamt N Simulationsschritten

Mit Hilfe des Ergebnisses können Unsicherheiten ausgewiesen und der Erwartungswert bestimmt werden. Des Weiteren lässt sich eine globale Sensitivitätsanalyse durchführen, auf die im nächsten Abschnitt näher eingegangen wird.

### 5.5.2.3 Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalysen ermitteln den Einfluss, den eine oder mehrere Eingangsparameter auf ein Berechnungsergebnis haben. Dabei kann zwischen lokalen und globalen Sensitivitätsanalysen unterschieden werden, wobei lokale Analysen die Auswirkung der Veränderung eines Eingangsparameters  $x_i$  auf das Berechnungsergebnis  $y_i$  untersuchen, so dass  $\delta x_i / \delta y_i$  ausgewiesen wird. Bei globalen Sensitivitätsanalysen wird bei (gleichzeitiger) Variation mehrerer Eingangsparameter ihr Beitrag zur Änderung des Gesamtergebnisses untersucht (SALTELLI et al. 2008).

In dieser Arbeit werden beide Analysearten eingesetzt. Die lokale Sensitivitätsanalyse kommt zur Darstellung des Einflusses des Diskontierungzinssatzes und der Kostensätze auf die Lebenszykluskosten zum Einsatz. Die globale Sensitivitätsanalyse wird zur Untersuchung von externen Kosten verwendet, da sie wie beschrieben sehr gut mit einer Monte-Carlo-Simulation kombiniert werden kann. Die in Matlab mit Zufallszahlen abgebildeten Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden dazu in das Programm SimLab, Version 2.2, exportiert, das vom Joint Research Centre der Europäischen Kommission bereitgestellt wird und dessen mathematische Modelle in SALTELLI et al. (2004) umfassend beschrieben werden.

Als Ergebnis wird der Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient für alle Eingangsvariablen bestimmt. Dieser ermittelt die Korrelation zwischen Eingangsparameter und Ergebnis, wobei die Berechnungsergebnisse zuerst in Rangreihen dargestellt werden, so dass nicht die direkte Korrelation der Ergebnisse, sondern die der Ergebnisränge berechnet werden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass auch die Korrelation von nichtlinearen Systemen sowie Ergebnissen, die auf einer Ordinalskala dargestellt sind, bestimmt werden können (BENESCH 2013). Der Rangkorrelationskoeffizient  $r_s$  nach Spearman errechnet sich nach Gl. 5.4 zu:

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^N [(R(x_i) - \bar{R}(x)) \cdot (R(y_i) - \bar{R}(y))]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (R(x_i) - \bar{R}(x))^2 \cdot \sum_{i=1}^N (R(y_i) - \bar{R}(y))^2}} \quad (5.4)$$

mit  $R(x_i), R(y_i) =$  Ränge der Merkmale  $x_i$  und  $y_i$

$\bar{R}(x), \bar{R}(y) =$  arithmetische Mittel der Ränge  $x_i$  und  $y_i$

Die Ergebnisse von  $r_s$  bilden die Rangkorrelation dabei in dem Intervall  $[-1, 1]$  ab und werden für alle Eingangsparameter errechnet. Eventuell existierende Kovarianzen der Monetarisierungsansätze werden dabei vernachlässigt, da sie sehr schwer zu bestimmen sind.

Sie sind in der Realität zumindest für einige Parameter aber existent. Als Beispiel kann die Abhängigkeit der Kraftstoffkosten für Diesel und Benzin genannt werden. Zwischen den Treibstoffverbräuchen, Schadstoffausstößen und Verspätungszeiten bestehende Korrelationen sind in den verwendeten Eingangsdatenverteilungen enthalten, da diese Parameter mit Hilfe des entwickelten Verkehrsmodells errechnet und existierende Korrelationen damit in den Ergebnissen abgebildet werden.

### 5.5.3 Abbildung von Unsicherheiten

Die Analysemethoden zum Umgang mit Unsicherheiten werden in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben. An dieser Stelle folgt eine Zusammenstellung, wie die im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung von Brückenbauwerken existierenden Unsicherheiten abgebildet werden und was die jeweiligen Ursachen der Unsicherheitskomponenten sind.

Tabelle 5.4 fasst diese Aspekte zusammen und verwendet als Ansatz zur Modellierung von Unsicherheiten die drei in Abschnitt 5.5.1 aufgeführten Herangehensweisen. Die genannten Ansätze werden vollständig für die probabilistischen Berechnungen im nächsten Kapitel verwendet.

Tabelle 5.4: Existierende Unsicherheiten im Rahmen der ganzheitlichen Analyse von Brückenbauwerken und verwendete Modellierungsansätze

Aspekt	Ursache d. Unsicherheit	Ansatz zur Modellierung
Brückenportfolio Deutschland	Bauwerke sind Unikate	Konzentration auf den Anwendungsfall Autobahnbrücken: - Definition von Referenzbrücken (Szenarien) - <i>keine</i> Integration von Massen- und Transportunsicherheiten
Nutzungsdauer Brücke	Exposition, Resilienz, Beanspruchung, Bauweise, ...	Festlegung der Referenz-Nutzungsdauer auf 100 Jahre auf Grundlage von Normen (u. a. zur Gewährleistung der Ergebnisvergleichbarkeit)
Bauteilerneuerungszyklen	Expositionsabhängigkeit und Instandhaltungsmanagement	Definition von 3 Instandhaltungsstrategien auf Bauteilebene basierend auf dem Ansatz von 100 Jahren Referenz-Nutzungsdauer des Bauwerks
Dauer der Baumaßnahmen	Maßnahmen- und Jahreszeitabhängigkeit	Aufbauend auf den Instandhaltungsszenarien: - Definition von festen, maßnahmenabhängigen Mindestbauzeiten auf Grundlage des Bauzeitenkatalogs - General-Extreme-Value-Verteilungsfunktion (GEV-Verteilung) auf Grundlage der Repräsentativbauwoche zur Berücksichtigung von Jahreszeiteinflüssen (Tageslichtverfügbarkeit und Schlechtwetter)

Fortsetzung der Tabelle siehe nächste Seite.

## 5 Modellierung

Fortsetzung Tabelle 5.4: Unsicherheiten und Modellierungsansätze

Aspekt	Ursache d. Unsicherheit	Ansatz zur Modellierung
Verkehrsbelastung und damit zusammenhängende Verkehrsparameter	Orts- und Zeitabhängigkeit	<p>Definition von vier verschiedenen Autobahntypen mit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bestimmung des DTV und Schwerverkehrsanteils</li> <li>- Gangliniendefinition und Umleitungslängen</li> </ul> <p>Abbilden der Verkehrsnachfrageschwankung durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Standardnormalverteilung der ankommenden Fahrzeuge</li> <li>- Standardnormalverteilung der gefahrenen Geschwindigkeiten für den Umleitungsfall</li> </ul>
Schadstoffausstöße	Flotten- und Fahrerabhängigkeit	<p>Verwendung der im Handbuch Verkehrsemissionen angegebenen Durchschnittswerte und Ansatz von Streuungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- bei Differenzbetrachtungen Ansatz einer Normalverteilung der Emissionen mit geringen Streuungen</li> <li>- bei Umleitungsstrecken Verwendung der im Handbuch Verkehrsemissionen angegebenen normalverteilten Streuungen</li> </ul>
Kostenansätze der Lebenszykluskostenrechnung	Verfahrens- und Marktabhängigkeit (Konkurrenz, Auslastung, regionale Unterschiede, ...)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ableiten eines maximalen, durchschnittlichen und minimalen Kostenansatzes und Integration dieser in drei Berechnungsszenarien</li> <li>- ausschließlich Durchführung von Variantenvergleichen, absolute Zahlen spielen eine untergeordnete Rolle</li> </ul>
Diskontierungsrates	Entwicklung der Märkte und Nutzerpräferenzen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lebenszykluskosten: Sensitivitätsanalyse bei Variation der Diskontierungsrates von 1,5 % bis 3 %</li> <li>- externe Kosten: keine Anwendung einer Diskontierung zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit den Ökobilanzierungsergebnissen</li> </ul>
Monetarisierungsansätze externer Effekte	<ul style="list-style-type: none"> <li>- studienspezifische Erhebungsmethoden</li> <li>- ggf. sehr lange Prognosezeiträume</li> <li>- unklare Wirkungen auf Schadensendpunkte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Analyse von Metastudien, die verschiedene Bewertungsansätze in Bezug zueinander setzen</li> <li>- Ableiten von Verteilungsfunktionen, die alle (bekannten) Unsicherheiten abbilden</li> </ul>



## 6 Anwendung

Alle nicht temporären Brückenbauwerke sind Unikate. Daher kommt der anwendungsfallbezogenen Analyse eine wichtige Bedeutung zu, um praxisrelevante Parameterkombinationen zu erfassen und daraus Empfehlungen für eine baupraktische Anwendung ableiten zu können. Dieses Vorgehen ist umso mehr von Bedeutung, wenn zusätzlich externe Effekte in die Untersuchungen integriert werden.

Im Folgenden werden fünf verschiedene Brücken vorgestellt, an denen eine Anwendung der beschriebenen Analysemethoden stattfindet. Einführend werden die wichtigsten Ergebnisse von Verkehrseffekten entstehend bei Brückenbaustellen erläutert, im Anschluss findet die Darstellung und Deutung der deterministischen und probabilistischen Berechnungen statt. Die Ergebnisse finden Eingang in die konzeptionelle Integration des nächsten Kapitels.

### 6.1 Brückenbauwerke

Die untersuchten Brücken lassen sich in zwei Klassen einteilen: Bauwerke mit unten liegender Autobahn und oben liegender Landes- bzw. Bundesstraße (A-Brücken) sowie Bauwerke mit oben liegender Autobahn zur Querung von Tälern (B und C-Brücken). Die A-Brücken besitzen dabei eine Spannweite von ca. 45 m, die B-Brücke eine Länge von ca. 150 m und die C-Brücke eine Länge von ca. 450 m.

Bei dem Brückentyp A werden drei verschiedene Varianten untersucht, die unterschiedliche Konstruktionsansätze verkörpern. Brücke A1 ist eine Stahlverbund-Integralbrücke, Brücke A2-V eine Zweifeld-Verbundbrücke mit Mittelstütze und Brücke A2-B eine Zweifeld-Stahlbetonbrücke, die in Ortbetonbauweise mit Mittelstütze hergestellt wird. Die Brücken B und C sind jeweils als Mehrfeld-Durchlaufträgersystem mit einem Verbundhohlkasten ausgebildet. Alle Brückentypen, die untersuchten Brückenvarianten sowie die für den jeweiligen Typ durchgeführten Szenarioanalysen sind Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 zusammengetragen.

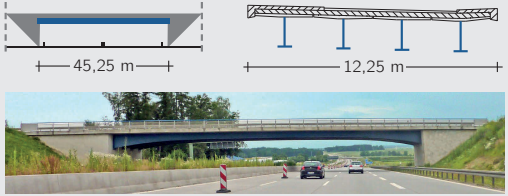
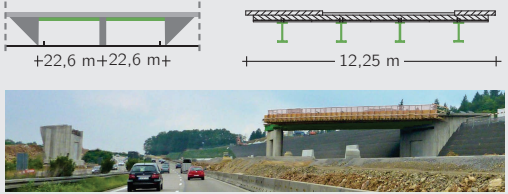
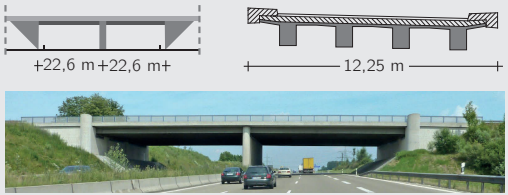
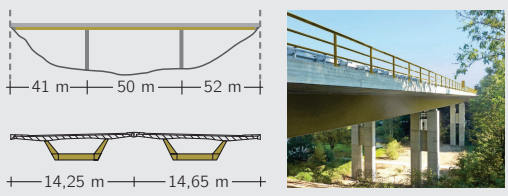
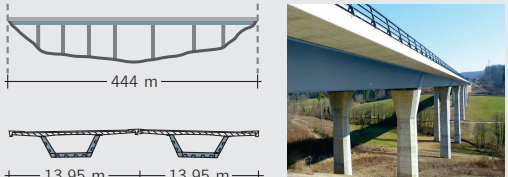
Bezeichnung	Brückensymbol, Querschnitt und Ansicht Beispielbauwerk	Beschreibung
<p><b>A1</b> Einfeld Integral</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autobahn untenliegend</li> <li>- Integrale Brücke (Rahmen)</li> <li>- VFT-Träger mit geschweißten Profilen, vier Längsträger</li> <li>- schlaff bewehrte Ort betonplatte</li> <li>- Variierende Trägerhöhe von 0,93 m (Feldmitte) bis 2,18 m (Auflagerbereiche)</li> </ul>
<p><b>A2-V</b> Zweifeld Verbund</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autobahn untenliegend</li> <li>- 2-feldriges Durchlaufträger-system mit Mittelstütze</li> <li>- Träger aus gewalzten Profilen, insgesamt 4 Längsträger</li> <li>- schlaff bewehrte Ort betonplatte</li> <li>- konstante Trägerhöhe mit 1,0 m</li> </ul>
<p><b>A2-B</b> Zweifeld Stahl- beton</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Autobahn untenliegend</li> <li>- 2-feldriges Durchlaufträger-system mit Mittelstütze</li> <li>- Plattenbalkenbrücke mit 4 Ort betonträgern</li> <li>- schlaff bewehrte Ort betonplatte</li> <li>- konstante Trägerhöhe</li> </ul>
<p><b>B</b> 3-Feld Durchlauf</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Talbrücke</li> <li>- Autobahn obenliegend</li> <li>- 3-feldriges Durchlaufträger-system</li> <li>- einzelliger Verbundhohlkasten, Stahlrog mit aussteifenden Querschotten an den Auflagern</li> <li>- aufbetonierte Ort betonplatte</li> </ul>
<p><b>C</b> 8-Feld Durchlauf</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tablbrücke</li> <li>- Autobahn obenliegend</li> <li>- 8-feldriges Durchlaufträger-system</li> <li>- Verbundhohlkasten, mehrzelliger Stahlrog</li> <li>- aufbetonierte Ort betonplatte, in Querrichtung vorgespannt</li> </ul>

Abbildung 6.1: Übersicht der untersuchten Referenzbrücken

Ausführungsvarianten	Instandhaltungsstrategien			Autobahntypen			
	Präventiv	Zustandsbest.	Alterung	Pendler	Grundlast	Land	WE
<b>A1, Variante 1:</b> Asphaltübergänge mit Bauwerksanschlussprofil und Korrosionsschutz Kategorie C3, keine Lager, da integrale Bauweise				DTV <sup>1</sup> 100.000	DTV <sup>1</sup> 70.000	DTV <sup>1</sup> 40.000	DTV <sup>1</sup> 30.000
	* In allen Auswertungen wird die jeweilige Strategie mit „Strategiepfeilen“ gekennzeichnet. Ein Pfeil bedeutet, dass die Strategie analysiert wird.			<sup>1</sup> Alle Autobahnsituationen werden mit dem jeweiligen DTV der Autobahn gekennzeichnet. Eine Nennung bedeutet, dass die Strategie analysiert wird.			
<b>A2-V, Variante 1:</b> einprofilige Lamellenübergänge, Elastomerlager und Korrosionsschutz Kategorie C3  <b>A2-V-WT, Variante 2:</b> einprofilige Lamellenübergänge, Elastomerlager und Wetterfester Stahl (WT-Stahl)				DTV 100.000	DTV 70.000	DTV 40.000	DTV 30.000
	-		-	-	DTV 70.000	-	-
<b>A2-B, Variante 1:</b> einprofilige Lamellenübergänge, Elastomerlager und Betonoberflächenschutz	-		-	-	DTV 70.000	-	-
	# Ökobilanzielle Untersuchungen werden nur für die gekennzeichneten Strategien der A-Brücken durchgeführt, Lebenszykluskosten und externe Kosten werden für alle genannten Strategien berechnet.			Sachverhalt oben    Sachverhalt unten Für alle A-Brücken wird angegeben, welche Straßen analysiert werden.			
<b>B, Variante 1:</b> mehrprofilige Lamellenübergänge, Elastomerlager und Korrosionsschutz Kategorie C3  <b>B-I, Variante 2:</b> „Innovative“ Variante mit Fingerübergängen, Kalottenlagern und Korrosionsschutz Kategorie C3				-	-	DTV 40.000	DTV 30.000
	-		-	-	-	DTV 40.000	-
<b>C, Variante 1:</b> mehrprofilige Lamellenübergänge, Kalottenlager und Korrosionsschutz Kategorie C3  <b>C-WT, Variante 2:</b> Variante mit mehrprofiligen Lamellenübergängen, Kalottenlagern und WT-Stahl				-	-	DTV 40.000	DTV 30.000
	-		-	-	-	DTV 40.000	-

Abbildung 6.2: Übersicht der bauwerksspezifisch untersuchten Szenarien

Die Auswahl der Brückenarten basiert auf ihrer Praxisbedeutung. Brücken mit kleiner bis mittlerer Spannweite (5 bis 50 m) haben im deutschen Straßennetz einen Anteil von über 60 % an der Gesamtbrückenanzahl (SCHMITT et al. 2005). Verbundhohlkastenbrücken sind eine wichtige Konstruktionsvariante für größere Spannweiten. Daher wird auf diese beiden Brückenarten ein Schwerpunkt gelegt, Bogen- oder Fachwerkbrücken werden nicht untersucht. Die Datenerhebung erfolgt jeweils anhand von Beispielbauwerken, die aus umgesetzten Projekten ausgewählt werden. Die Daten der Beispielbrücken werden vor allem hinsichtlich der Bauwerksabmessungen so modifiziert, dass sie einheitliche Spannweiten und Überbaubreiten aufweisen. Die fünf Brücken können damit als Referenzbauwerke bezeichnet werden, da sie typische Konstruktionsweisen abbilden und eine Ergebnisübertragbarkeit auf praxisrelevante Bausituationen ermöglichen.

Die in Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 verwendete Notation, eingeführten Symbole und Kennzeichnungsfarben werden in der Ergebnisdarstellung durchgehend verwendet und dienen der übersichtlichen Darstellung aller aufgeführten Eingangsparameter zur besseren Ergebnisinterpretation. Da die drei verschiedenen Konstruktionsweisen der A-Bauwerke einen Szenariotrichter verschiedener Bauausführungen aufspannen und alle für dieselbe Bauaufgabe verwendet werden können, werden die Ergebnisse zusammen dargestellt und miteinander verglichen. Um möglichst unterschiedliche Szenarien zu verwenden, wird angenommen, dass die Herstellung von Brücke A2-B vollständig in Ortbeton erfolgt. Natürlich ist auch eine Bauweise unter Verwendung von Stahlbetonfertigteilen möglich, diese Bauart wäre der Ausführung der Variante A2-V allerdings sehr ähnlich und würde die Bandbreite möglicher Ergebnisse nicht aufzeigen. Die Ergebnisse für die Referenzbrücken B und C werden separat ausgewiesen, da ihnen jeweils sehr unterschiedliche Bauaufgaben zu Grunde liegen.

Im Fall der A-Referenzbauwerke wird die gesamte Brücke in die Analysen integriert, wobei die im Rahmen der Erläuterung der Analysemethoden in Kapitel 5 beschriebenen Systemgrenzen verwendet werden. Da bei den A-Brücken externe Effekte durch die oben liegende Bundes- bzw. Landesstraße oder die unten liegende Autobahn entstehen können, wird jeweils der für die externen Effekte verantwortliche Sachverhalt gekennzeichnet. Im Zuge der Errichtungsphase unter Umständen zum Einsatz kommende Behelfsbrücken werden nicht in die Analysen integriert, da ein Einsatz einzelfallbezogen erfolgt und stark von der Position der Brücke im Netz abhängig ist.

Für die Referenzbrücken B und C sind immer beide Überbauten in den Ergebnissen enthalten. Dieser Ansatz ist notwendig, da bei der Definition der baumaßnahmenabhängigen Verkehrsführungen davon ausgegangen wird, dass bei Baumaßnahmen an einem Überbau

der Verkehr über den jeweils anderen Überbau geleitet werden kann. Wäre dies nicht der Fall, entstünden vollständig unterschiedliche Ergebnisse im Rahmen der externen Kostenrechnung, da lange Umfahrungswege in die Analysen miteinzubeziehen wären.

## 6.2 Verkehrseffekte

Alle im Rahmen dieser Arbeit berechneten externen Effekte bzw. externen Kosten können auf verschiedenen Skalen dargestellt werden. Da die Modellierung auf Stundenbasis erfolgt, ist eine detaillierte Auswertung möglich, die zur Analyse von ergebnisbeeinflussenden Ursachen verwendet werden kann. I. d. R. werden die Ergebnisse in den folgenden Abschnitten für alle Bauwochen einer Lebenszyklusphase aufsummiert. In diesem Abschnitt werden nur externe Zeitkosten entstehend durch Verspätungen für den unten liegenden Sachverhalt (Autobahn) der A-Brücken dargestellt, weitere externe Kostenkomponenten werden in den folgenden Abschnitten diskutiert.

Für die beiden Autobahntypen der Grundlast- und Pendlerautobahn werden die entstehenden, stundengenauen externen Zeitkosten in Abbildung 6.3 visualisiert. Bei der Einrichtung einer Verkehrsführung mit 3+3 Fahrstreifen entstehen bei einem DTV von 70.000 Fz/Tag noch keine Verkehrsstaus. Bei einer Kapazitätsreduzierung auf 2+2 Fahrstreifen sind vor allem wochentags in den Morgen- und Abendstunden Staueffekte an der deutlichen Zunahme der externen Zeitkosten zu erkennen.

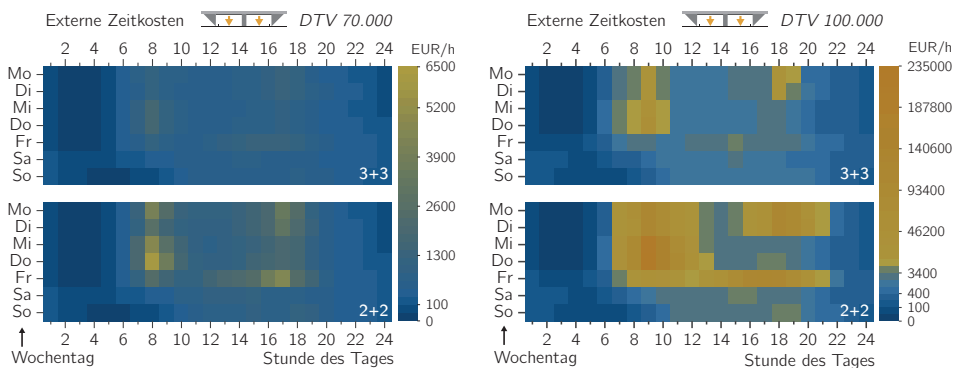


Abbildung 6.3: Rasterdiagramm der entstehenden stundengenauen externen Zeitkosten einer Bauwoche für die zwei Autobahntypen der Grundlastautobahn (DTV 70.000, links) und der Pendlerautobahn (DTV100.000, rechts), angesetzt werden eine Verkehrsführung mit 3+3 Fahrstreifen (oben) und eine Verkehrsführung mit 2+2 Fahrstreifen (unten)

Im Fall der Pendlerautobahn mit einem DTV von 100.000 Fz/Tag entstehen Staus schon bei einer 3+3 Verkehrsführung, bei einer Reduzierung auf insgesamt vier verfügbare Fahrstreifen steigen die externen Zeitkosten stark an. Aufgrund identischer Wochenganglinien der Grundlast- und Pendlerautobahn und ähnlicher Tagesganglinien ist die zeitliche Verteilung der Effekte vergleichbar, bei der Land- und Wochenendautobahn ergeben sich unterschiedliche Verteilungen. Diese sind in Abbildung 6.4 auf der rechten Seite für die einzelnen Wochentage visualisiert.

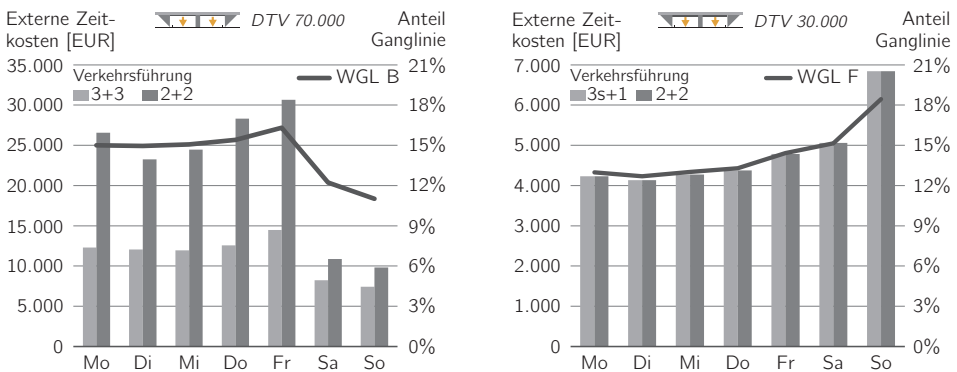


Abbildung 6.4: Tagesgenaue externe Zeitkosten einer Bauwoche für die zwei Autobahntypen der Grundlastautobahn (DTV 70.000, links) und der Wochenendautobahn (DTV 30.000, rechts) und zu Grunde liegende Tagesganglinie

Bei Analyse der externen Zeitkosten für die einzelnen Wochentage ergibt sich ein Verlauf der externen Kosten analog zu dem Verlauf der Wochenganglinie, wenn die Kapazität der Verkehrsführung oberhalb der Verkehrsnachfrage liegt, was beispielsweise für die 3+3 Verkehrsführung der Grundlastautobahn in Abbildung 6.4 links der Fall ist. Bei Überschreiten der Grenzkapazität (z. B. bei einer 2+2 Verkehrsführung der Grundlastautobahn) findet eine exponentielle Steigerung der externen Effekte statt. Dies führt je nach Tagesganglinie und daraus resultierenden Staulängen zu unterschiedlich hohen externen Zeitkosten. Diese Zusammenhänge sind unabhängig vom Brückentyp und zeigen sich auch für die weiteren externen Kostenarten.

Wenn die für eine Bauwoche aufsummierten externen Zeitkosten mit einer brückenspezifischen Instandhaltungsstrategie kombiniert werden, kann der gesamte Lebenszyklus auf Basis wochengenaue Ergebnisse abgebildet werden. Die Abbildung 6.5 enthält die Angabe der Kapazitätsreduzierung sowie die dadurch entstehenden externen Zeitkosten für alle hintereinander aufgereihten Bauwochen im Lebenszyklus der Integralbrücke A1. Dargestellt ist nur der unten liegende Sachverhalt der Autobahn, für eine vollständige

Berechnung muss – wie in den nachfolgenden Abschnitten geschehen – zusätzlich der oben liegende Sachverhalt der Bundesstraße berechnet werden. Die einzelnen Bauwochen können dem jeweiligen Ausführungsjahr der Maßnahmen bzw. der Lebenszyklusphase zugeordnet werden.

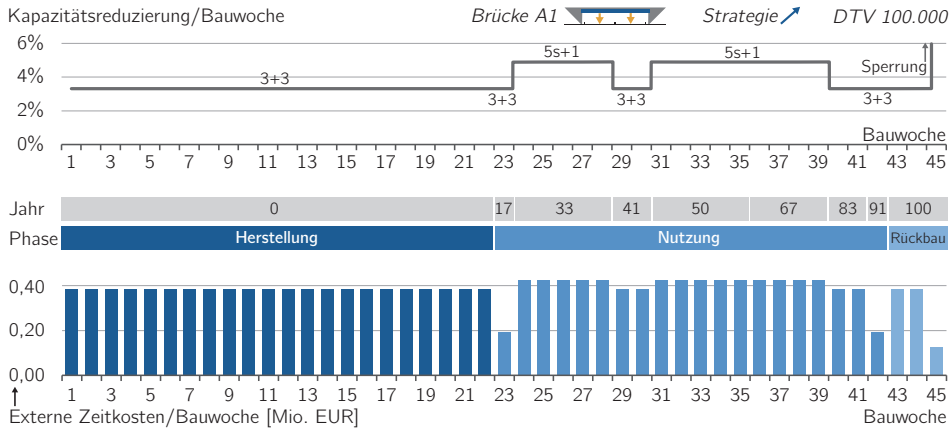


Abbildung 6.5: Kapazitätsreduzierung für alle hintereinander aufgereihten Bauwochen (oben) und wochengenaue externe Zeitkosten im gesamten Lebenszyklus (unten)

Werden die bauwochenspezifischen externen Zeitkosten als Summenlinie bezogen auf das jeweilige Ausführungsjahr dargestellt, resultiert daraus der in Abbildung 6.6 gezeigte Verlauf der externen Zeitkosten für alle Jahre des Lebenszyklus. Die Werte können auch für die einzelnen Lebenszyklusphasen aggregiert dargestellt werden, siehe Abbildung 6.6 rechts. Diese beiden Darstellungsarten werden im Weiteren zur Analyse der externen Kosten verwendet und basieren immer auf den vorgestellten stundengenauen Analysen der baustelleninduzierten externen Effekte.

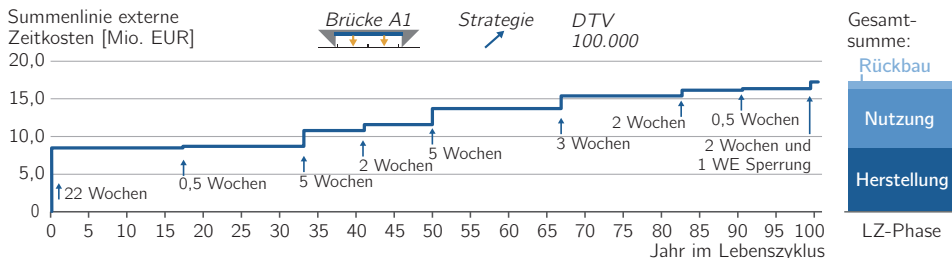


Abbildung 6.6: Summenlinie der externen Zeitkosten im gesamten Lebenszyklus (links) sowie Summen der externen Zeitkosten pro Lebenszyklusphase (rechts)

## **6.3 A-Referenzbauwerke: Autobahn unten liegend**

### **6.3.1 Ergebnisse externe Kostenrechnung**

In diesem Abschnitt werden die vorgestellten Parameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Höhe und den Verlauf der externen Kosten analysiert und die Ergebnisse des gesamten Lebenszyklus ausgewiesen. Zunächst werden einheitlich nur die deterministischen Eingangsparameter verwendet, Einflüsse streuender Eingangsparameter werden abschließend im Rahmen der Unsicherheitsanalysen zusammengefasst.

Im Folgenden werden die Kostenarten der externen Kosten dargestellt und bezüglich des Ergebniseinflusses untersucht. Dies geschieht unter Annahme der Randbedingungen der Grundlastautobahn sowie der zustandsbestimmten Instandhaltungsstrategie, die beide als Referenzszenarien verwendet werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse der verschiedenen Konstruktionsvarianten, Instandhaltungsstrategien und Autobahntypen verglichen.

#### **6.3.1.1 Ergebnisbeeinflussende Komponenten**

Die Darstellung der externen Kosten getrennt nach oben liegender Landesstraße und unten liegender Autobahn in Abbildung 6.7 zeigt, dass die externen Kosten entstehend auf der Autobahn um den Faktor drei größer sind als die der Landesstraße. Gleichzeitig ist für beide Sachverhalte der Anteil der einzelnen Lebenszyklusphasen stark unterschiedlich. Während im Fall der Autobahn 56 % der externen Kosten in der Herstellungsphase entstehen, entfallen 84 % bei der Landesstraße auf die Nutzungsphase. Ursache hierfür sind die unterschiedlichen verkehrsbeeinflussenden Baumaßnahmen für beide Sachverhalte sowie die unterschiedliche Berechnung externer Kosten entstehend durch Kapazitätsreduzierungen (unten) und Umleitungsstrecken (vornehmlich oben), siehe Anhang E.2 und E.3.

Als Bestandteile der externen Kosten werden die Kostenarten der externen Umwelt-, Betriebs- und Zeitkosten unterschieden. Für beide Sachverhalte zeigt sich, dass externe Umweltkosten für das Gesamtergebnis eine untergeordnete Rolle spielen. Für die Autobahn ist das Ergebnis mit der durchgeführten Differenzbetrachtung zwischen Normal- und Baustellenbetrieb zu begründen, die zu niedrigen und teilweise sogar negativen (siehe Vergleiche der Autobahntypen) externen Umweltkosten führen. Allerdings zeigen die Vergleiche mit den Ergebnissen der Ökobilanzierung in Abschnitt 6.3.2, dass noch weitere Aspekte für die vergleichsweise geringe Bedeutung verantwortlich sein müssen. Eine



ausführliche Diskussion zu der Berücksichtigung von Schadstoffemissionen des Verkehrs im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen wird in Kapitel 7 durchgeführt.

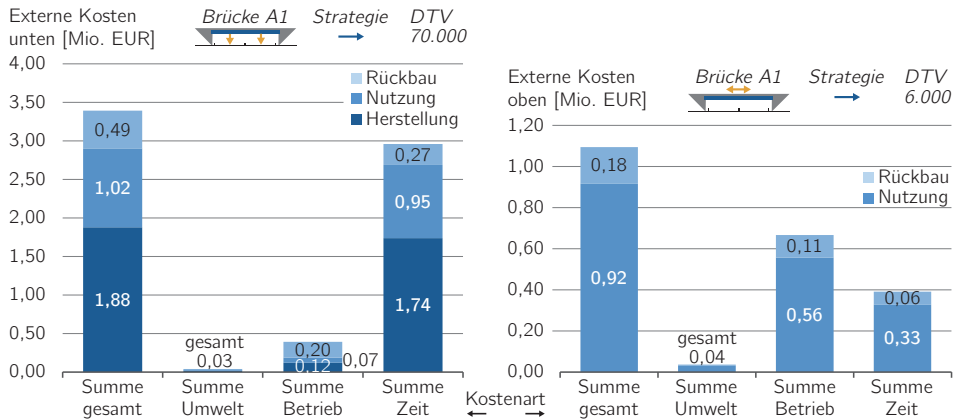


Abbildung 6.7: Externe Kosten der Brücke A1 getrennt nach unten liegendem Sachverhalt (links) und oben liegendem Sachverhalt (rechts) und ausgewiesen für verschiedene Kostenarten und Lebenszyklusphasen

Für die unten liegende Autobahn ist die Kostenart der externen Zeitkosten maßgebend für das Gesamtergebnis, während externe Betriebskosten eine deutlich geringere Rolle spielen. Bei der oben liegenden Landesstraße sind externe Betriebskosten die Kostenart mit dem größten Anteil am Gesamtergebnis, externe Zeitkosten tragen hier 35 % zum Gesamtergebnis bei.

### 6.3.1.2 Konstruktionsvergleiche

Die einheitliche Dimensionierung der drei A-Referenzbauwerke erlaubt eine direkte Gegenüberstellung der Ergebnisse, diese finden sich in Abbildung 6.8. Dort sind die Effekte aus oben und unten liegendem Sachverhalt aufsummiert. Die großen Ergebnisunterschiede resultieren überwiegend aus den unterschiedlich hohen externen Kosten der Herstellungsphase, die bei der Brücke A1 am kürzesten und bei A2-B am längsten ist. Hinzu kommt, dass für die Herstellung der beiden Zweifeldbrücken eine 2+2 Verkehrsführung eingerichtet wird, die zu Verkehrsstaus und somit zu einem überproportionalen Anstieg externer Kosten führt. Die verschiedenen Kostenarten zeigen in Abbildung 6.8 für die drei Brücken gleiche Anteile an dem jeweiligen Gesamtergebnis.

## 6 Anwendung

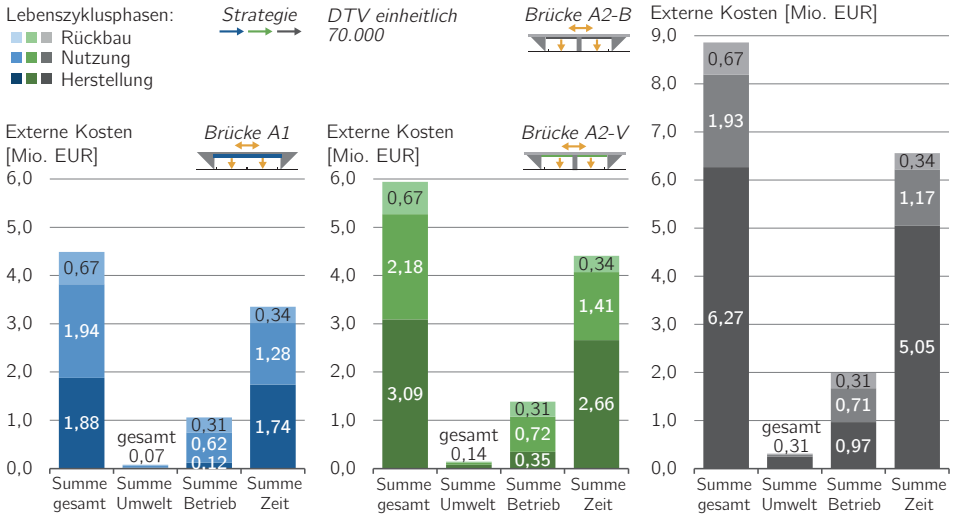


Abbildung 6.8: Vergleich der drei A-Referenzbauwerke hinsichtlich der externen Kosten im Lebenszyklus gegliedert nach Kostenarten

Werden die externen Kosten für den oben und unten liegenden Sachverhalt ausgewiesen, sind konstruktionspezifische Unterschiede ablesbar, siehe Abbildung 6.9. So liegen für beide Sachverhalte die Auswirkungen der Nutzungsphase in derselben Größenordnung. Für die Autobahn ergeben sich in dieser Phase durch die nicht erforderlichen Instandsetzungsmaßnahmen am Mittelpfeiler für die Integralbrücke A1 mit 1,02 Mio. Euro etwas geringere externe Kosten als für die Brücke A2-V. Bei der Stahlbetonbrücke A2-B ist keine Korrosionsschutzerneuerung erforderlich, so dass die externen Kosten der Nutzungsphase mit 0,85 Mio. Euro für den unten liegenden Sachverhalt unterhalb der anderen beiden Brücken liegen. Bei der Landstraße oben hat die Asphaltübergangskonstruktion der Brücke A1 eine vorteilhafte Auswirkung im Vergleich zu den Lamellenübergängen der beiden anderen Bauwerke. Die Phase des Rückbaus liefert für beide Sachverhalte und alle Brücken aufgrund einheitlicher Szenarioannahmen dieselben Ergebnisse.

Als konstruktive Variante der Zweifeld-Stahlverbundbrücke A2-V wird eine Ausführung der Längsträger in WT-Stahl untersucht und mit einem herkömmlichen organischen Korrosionsschutzsystem verglichen, siehe Abbildung 6.10. Die externen Kosten im Lebenszyklus können durch Anwendung des WT-Stahls um insgesamt 12 % reduziert werden, wobei die Vorteilhaftigkeit nur durch den unten liegenden Sachverhalt erzeugt wird. Die oben liegende Landesstraße wird durch Instandhaltungsmaßnahmen am organischen Kor-

### 6.3 A-Referenzbauwerke: Autobahn unten liegend

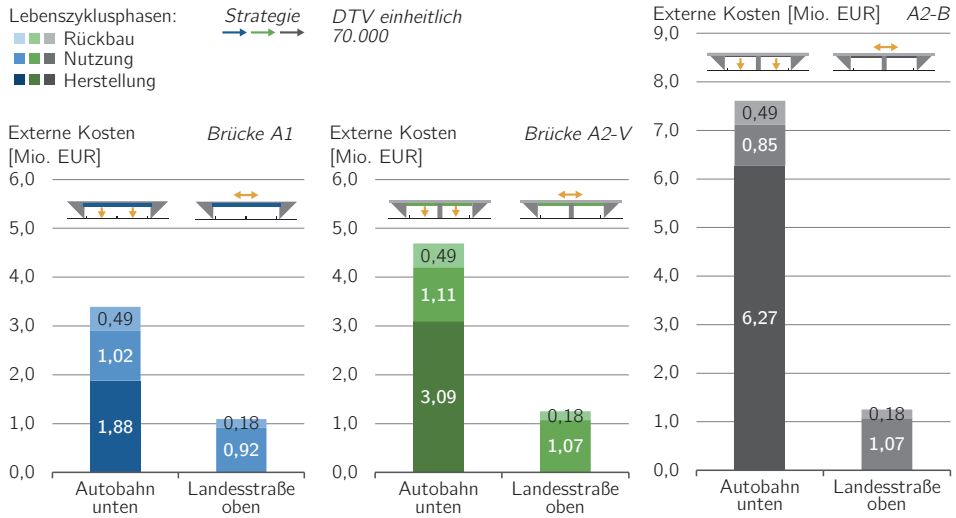


Abbildung 6.9: Vergleich der drei A-Referenzbauwerke hinsichtlich der externen Kosten im Lebenszyklus gegliedert nach oben und unten liegendem Sachverhalt

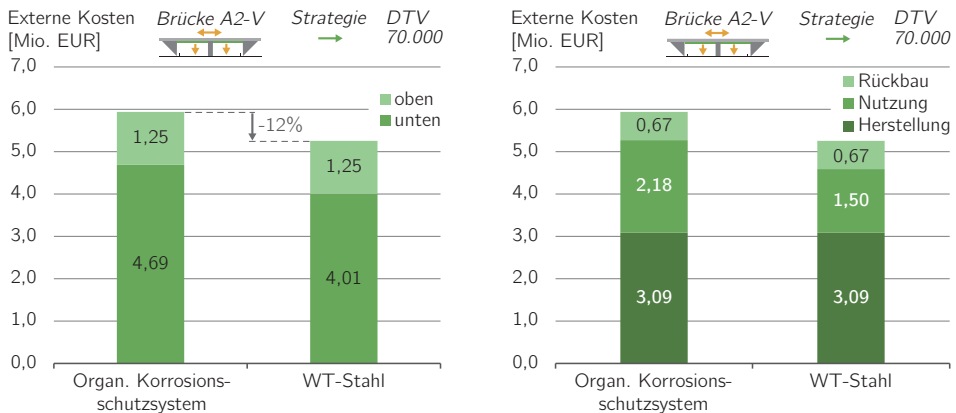


Abbildung 6.10: Vergleich eines organischen Korrosionsschutzsystems und einer Ausführung mit WT-Stahl für Brücke A2-V

rosionsschutz der sich an der Brückenunterseite befindenden Verbundträger nicht beeinflusst. Aus Abbildung 6.10 rechts geht hervor, dass die Reduzierung der externen Kosten durch den WT-Stahl nur in der Nutzungsphase stattfindet und die Auswirkungen von Herstellung und Rückbau identisch bleiben.

Ähnliche Vorteile können auch mit anderen Korrosionsschutzsystemen generiert werden. Untersuchungen zu feuerverzinkten Längsträgern von Stahlverbundbrücken zeigen, dass eine Minimierung von korrosionsschutzbezogenen Instandhaltungsmaßnahmen die externen Kosten in der Größenordnung von 15 % senken können, wobei das genaue Ergebnis immer anhängig von dem untersuchten Autobahntyp und den verwendeten Eingangsparametern ist (UMMENHOFER und ZINKE 2015). Insgesamt ist ersichtlich, dass sich durch das verwendete Berechnungsmodell Aspekte der Dauerhaftigkeit quantitativ beurteilen lassen und somit als Entscheidungsbasis hervorragend genutzt werden können. Genauso ist ein Vergleich von verschiedenen Instandhaltungsstrategien möglich, die im nächsten Abschnitt untersucht werden.

### 6.3.1.3 Instandhaltungsstrategien

Der Vergleich der drei definierten Instandhaltungsstrategien wirkt sich nur auf die Ergebnisse in der Nutzungsphase aus, externe Kosten für Herstellung und Rückbau sind bei allen untersuchten Szenarien identisch. In Abbildung 6.11 findet eine Ergebnisdarstellung aufgeschlüsselt für die einzelnen Jahre des Lebenszyklus statt. Externe Kosten für den oben und unten liegenden Sachverhalt werden dort getrennt ausgewiesen. Der Verlauf der externen Kosten von unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien bildet dabei die spezifischen Zielsetzungen der Strategien ab. Die Präventivstrategie zeichnet sich durch eine Vielzahl an kleineren Maßnahmen aus, während bei der zustandsbestimmten Strategie

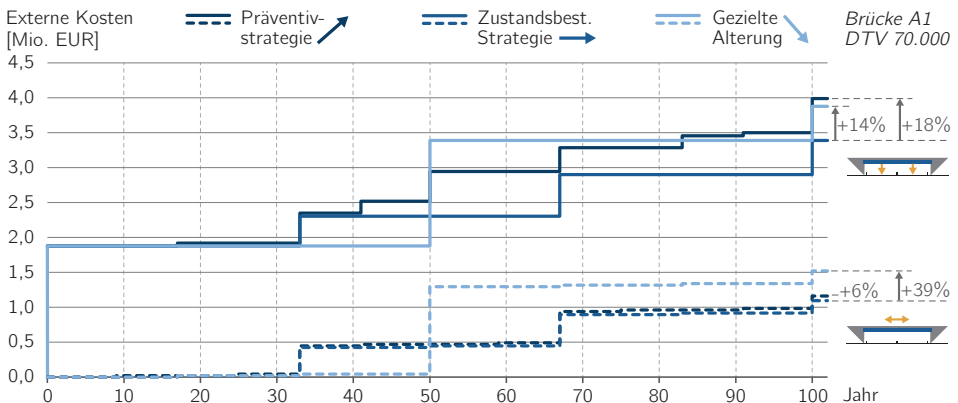


Abbildung 6.11: Vergleich der drei Instandhaltungsstrategien für Brücke A1 hinsichtlich der externen Kosten im Lebenszyklus gegliedert nach oben und unten liegendem Sachverhalt

vor allem eine Maßnahmenbündelung in den Jahren 33 und 66 stattfindet. Die Instandhaltungsstrategie der gezielten Alterung setzt nur ein Minimum an Baumaßnahmen um und erfordert daher die Erneuerung des Überbaus im Jahr 50 mit den damit einhergehenden großen Auswirkungen auf die externen Kosten.

Die prozentuale Bedeutung des oben bzw. unten liegenden Sachverhalts für das Gesamtergebnis ist für alle drei Instandhaltungsstrategien in etwa gleich. Beim Strategievergleich erweist sich die zustandsbestimmte Instandhaltung als die vorteilhafteste, für die anderen beiden Strategien ergeben sich teilweise deutlich höhere externe Kosten. Das Gesamtergebnis bei Addition der externen Kosten beider Sachverhalte ist in Abbildung 6.12 dargestellt. Durch die Addition ändert sich der grundsätzliche Verlauf der externen Kostenkurven nicht, die strategiebezogene Charakteristik bleibt erhalten. Für die Brücke A1 erzeugt die Präventivstrategie im Vergleich zur zustandsbestimmten Strategie um 15 % höhere externe Kosten, bei der Brücke A2-V sind es 9 %. Die Strategie der gezielten Alterung schneidet mit 20 % respektive 17 % höheren externen Kosten jeweils deutlich schlechter ab. Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Maßnahmenbündelung der zustandsbestimmten Strategie einen deutlich positiven Einfluss auf die Höhe der externen Kosten hat.

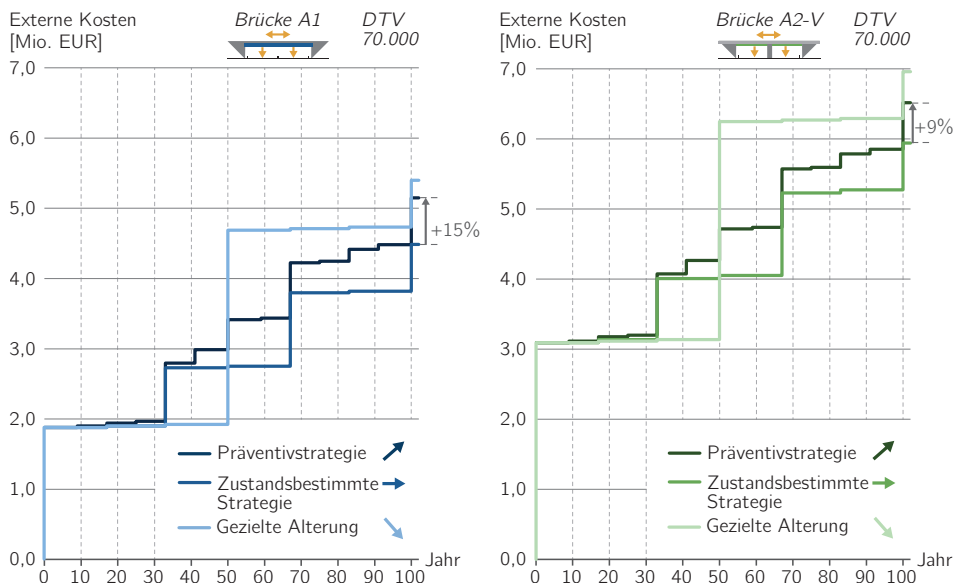


Abbildung 6.12: Vergleich der drei Instandhaltungsstrategien für die Brücken A1 und A2-V hinsichtlich der gesamten externen Kosten im Lebenszyklus

### 6.3.1.4 Autobahntypen

Bei den Vergleichen der vier Autobahntypen wird dasselbe Brückenbauwerk an unterschiedlichen Standorten positioniert, um den Einfluss unterschiedlicher Verkehrsverhältnisse abzubilden. Abbildung 6.13 zeigt die nach Sachverhalten aufgeschlüsselten Ergebnisse. Zu beachten ist dabei, dass die Wochenend- und Landautobahnen (DTV 30.000 bzw. 40.000 Fz/Tag) zwei Fahrstreifen pro Fahrtrichtung aufweisen und die anderen beiden Autobahntypen dreistreifige Strecken sind.

Bis zu einem DTV von 70.000 Fz/Tag zeigen sich annähernd lineare Zusammenhänge der externen Kosten für die unten liegende Autobahn, die damit begründet werden können, dass i. d. R. keine Überschreitung der Grenzkapazität auftritt. Die nichtlinearen Anteile lassen sich durch Einflüsse unterschiedlicher Ganglinien und Schwerverkehrsanteile erklären. Dasselbe gilt für den oben liegenden Sachverhalt der Landes- bzw. Bundesstraßen. Im Fall der Pendlerautobahn ist eine deutliche Steigerung der externen Kosten in allen Lebenszyklusphasen zu erkennen. Die Ursachen liegen in der Entstehung von Verkehrsstaus in den Tagesstunden mit hoher Verkehrsbelastung und der damit einhergehenden exponentiellen Zunahme externer Effekte.

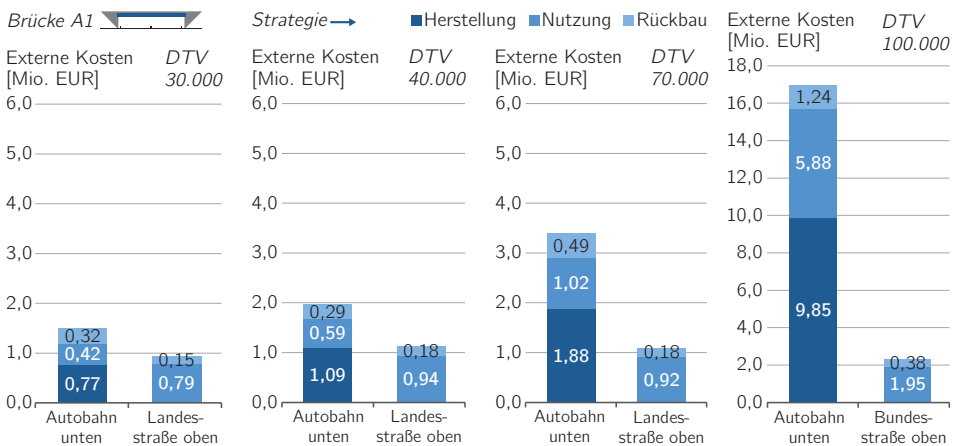


Abbildung 6.13: Vergleich der vier Autobahntypen für die Brücke A1 gegliedert nach oben und unten liegendem Sachverhalt

Bei der Analyse der einzelnen Kostenarten für die Landautobahn und Wochenendautobahn ergeben sich grundsätzlich dieselben Verhältnisse der Kostenarten zueinander wie für die Grundlastautobahn. Abbildung 6.14 zeigt jedoch, dass für die Autobahn in der

Summe negative externe Umweltkosten entstehen, so dass hier positive externe Effekte durch die Reduzierung von Emissionen zu identifizieren sind. Der Grund liegt in der nicht vorhandenen Geschwindigkeitsbegrenzung der Land- und Wochenendautobahn im Normalbetrieb. Durch die Begrenzung auf 80 km/h in der Baustelle wird insgesamt der Schadstoffausstoß gesenkt und aus der eingesparten Differenz entstehen die positiven externen Effekte. Diese treten auch im Fall der Referenzbrücken B und C auf. Allerdings entsteht durch den gleichzeitigen Anstieg der externen Zeitkosten aus volkswirtschaftlicher Sicht insgesamt ein Wohlfahrtsverlust durch die Baustelle.

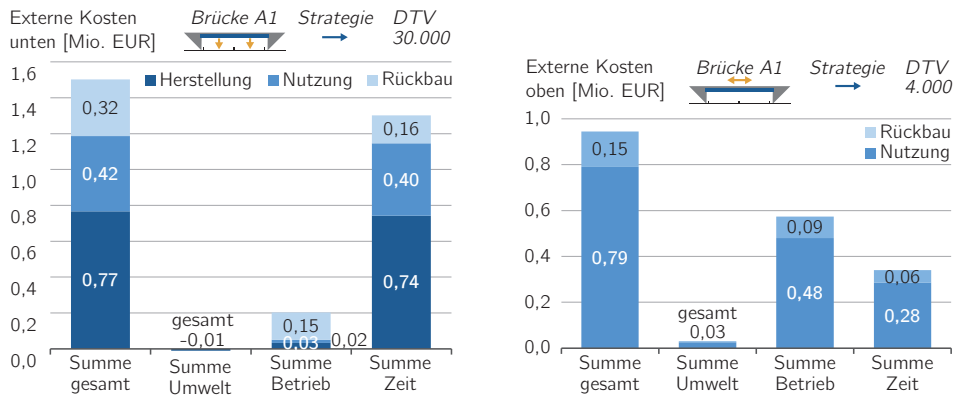


Abbildung 6.14: Externe Kosten der Brücke A1 für die Randbedingungen einer Wochenendautobahn unterteilt nach Sachverhalten und gegliedert nach Kostenarten

Bei der Gegenüberstellung der Auswirkungen von verschiedenen Autobahntypen auf die externen Kosten von Brücke A1 und A2-V ergibt sich das in Abbildung 6.15 dargestellte Bild, wobei die Kurven beider Brücken jeweils über den Lebenszyklus gleich verlaufen, da dieselbe Instandhaltungsstrategie zu Grunde gelegt wird. Zu beachten ist, dass der Lebenszyklus der rechten Teilabbildung von rechts nach links aufgetragen ist, damit ein besserer Vergleich der Endergebnisse möglich ist. Die Zweifeld-Stahlverbundbrücke A2-V erfordert sowohl in der Herstellung als auch in der Nutzungsphase längere Bauzeiten, die für die Land- und Wochenendautobahn zu höheren externen Kosten von + 15 % bzw. + 16 % gegenüber dem Ergebnis der Integralbrücke A1 führen. Im Fall der Grundlastautobahn (+ 32 % bei A2-V) und ganz besonders für die Pendlerautobahn (+ 127 % bei A2-V) ist allerdings ein deutlicher Unterschied zwischen den Brücken erkennbar. Die Ergebnisse werden vor allem durch die notwendige 2+2 Verkehrsführung in der Herstellungsphase von Brücke A2-V beeinflusst, die im Vergleich zu einer 3+3 Führung schon bei deutlich geringerer Verkehrsnachfrage zum Auftreten von Verkehrsstaus führt.

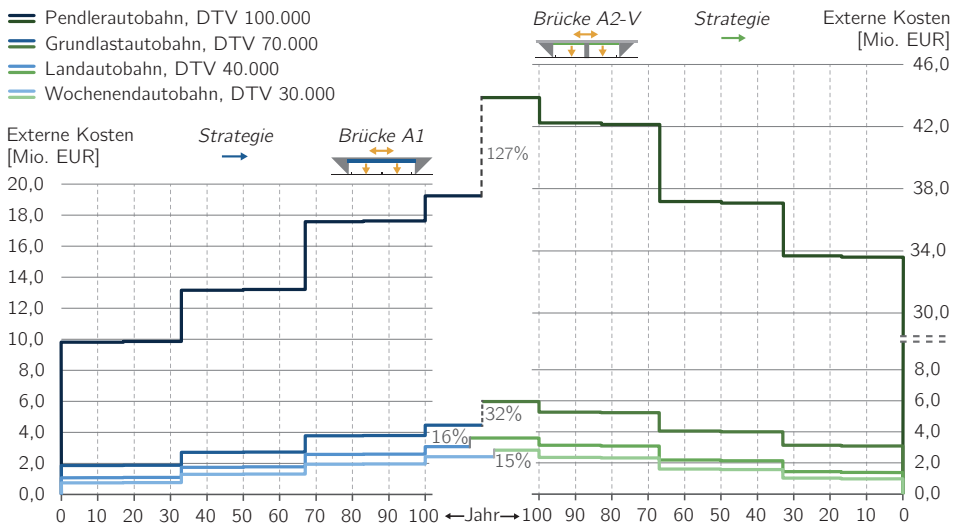


Abbildung 6.15: Vergleich der vier Autobahntypen für die zwei Brücken A1 und A2-V hinsichtlich der gesamten externen Kosten im Lebenszyklus

Es ist erkennbar, dass der relative Unterschied von verschiedenen Brückenkonstruktionen vor allem bei unterschiedlichen Verkehrsführungen während des Lebenszyklus stark von dem vorliegenden Autobahntyp abhängig ist. Auf Grundlage einer Bewertung der relativen Vorteilhaftigkeit an einem Standort kann damit nicht unbedingt auf die Vorteilhaftigkeit an einem anderen Standort geschlossen werden, insbesondere wenn neben externen Kosten noch weitere Entscheidungsparameter berücksichtigt werden, die eine unterschiedliche oder keine Abhängigkeit von den Verkehrsverhältnissen aufweisen.

### 6.3.1.5 Unsicherheiten

Alle bisherigen Ergebnisse sind mit deterministischen Eingangswerten unter Anwendung verschiedener Szenarien erzeugt worden. Durch die Definition von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen für alle Eingangsparameter sind probabilistische Analysen möglich, die mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt und im Folgenden vorgestellt werden.

Alle Monte-Carlo-Simulationen werden wie beschrieben mit  $10^5$  Simulationsschritten berechnet. Zur Überprüfung der Konvergenz des Berechnungsmodells findet vorab eine Analyse mit 1000 Simulationsschritten statt, die insgesamt zehn Mal ausgeführt werden.



Die Ergebnisse der Mittelwertentwicklung der externen Kosten sowie die sich jeweils ergebende Ergebnisverteilung sind in Abbildung 6.16 für zwei Kostenarten dargestellt. Zur Vereinfachung findet die Analyse nur für die Herstellungsphase und den unten liegenden Sachverhalt der Autobahn statt.

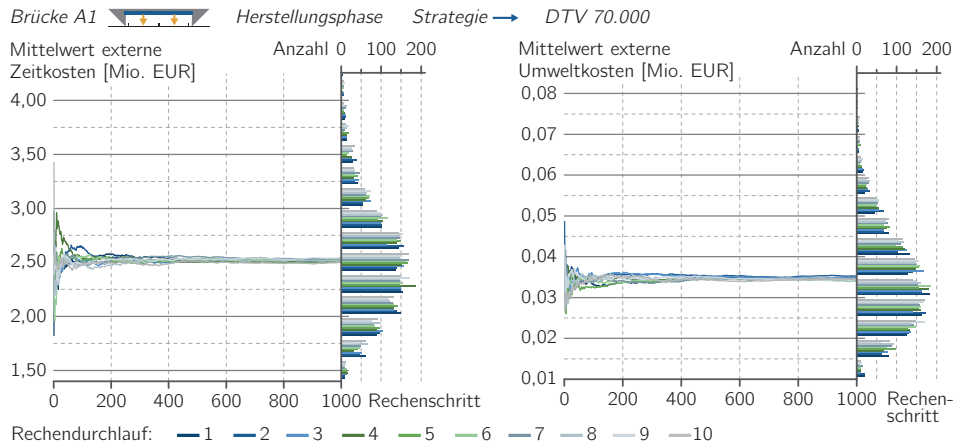


Abbildung 6.16: Konvergenzuntersuchungen zur Beurteilung des Berechnungsmodells für zwei Kostenarten und Histogramme der zehn Rechendurchläufe nach 1000 Rechenschritten

Die Ergebnisse zeigen, dass sich ab ca. 500 Simulationsschritten für beide Kostenarten ein stabiler Mittelwert einstellt. Bis zum 1000 Simulationsschritt nähern sich die Ergebnisse der einzelnen Rechendurchläufe langsam an. Auch die als Histogramm aufgetragene Verteilung der Einzelergebnisse zeigt ein einheitliches Bild, auch wenn hier geringe Abweichungen in den einzelnen Ergebnisklassen erkennbar sind. Die Ergebnisbandbreite reicht bei den externen Zeitkosten in der Herstellungsphase von Integralbrücke A1 einheitlich von 1,5 bis 4,0 Millionen Euro. Unter der Berücksichtigung der Ergebnisverteilung ergibt sich ein Mittelwert von 2,5 Millionen Euro, siehe Abbildung 6.16 links. Auf Grundlage der Konvergenzuntersuchungen mit 1000 Schritten ist von einer ausreichend genauen Darstellung des Gesamtergebnisses unter Verwendung von  $10^5$  Simulationsschritten für jede Baumaßnahme innerhalb des Brückenlebenszyklus auszugehen.

Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen sind in Abbildung 6.17 für die Integralbrücke A1 getrennt nach oben und unten liegendem Sachverhalt dargestellt. Die Histogramme charakterisieren die Ergebnisverteilungen und zusätzlich sind die 5% und 95%-Quantile angegeben, so dass die Verteilung besser beurteilt werden kann. Da die zur Erstellung der Histogramme verwendete Klasseneinteilung unterschiedlich groß ist, weisen

die Ergebnisse des oben und unten liegenden Sachverhalts nicht den gleichen Flächeninhalt auf. Bei der oben liegenden Landesstraße wird die Größe der Ergebnisklassen verkleinert und gleichzeitig die Skala der Ordinate vergrößert, damit die dreiecksförmige Verteilungsform besser zu erkennen ist. Bei der unten liegenden Autobahn ergibt sich vor allem beim Gesamtergebnis am Ende des Lebenszyklus eine Verteilung, die gut durch eine Normalverteilung approximiert werden kann. Die unterschiedlichen Verteilungsformen können durch die verwendeten unterschiedlichen Berechnungsmethoden für die unten liegende Autobahn (vorwiegend Kapazitätsreduzierungen) und oben liegende Landesstraße (Umleitungen) erklärt werden.

Abbildung 6.18 beinhaltet das Gesamtergebnis nach Addition der Ergebnisse beider Sachverhalte für die Integralbrücke A1, weist zusätzlich den Median der probabilistischen Berechnungen aus und stellt ihn den Ergebnissen der deterministischen Berechnungen gegenüber. Es zeigt sich, dass für die Herstellungsphase das deterministische Ergebnis nahe am 5%-Quantilwert der probabilistischen Berechnungen liegt. Bei Analyse des Gesamtergebnisses nach 100 Jahren befindet sich das deterministische Ergebnis deutlich unterhalb des 5%-Quantilwerts, da sich die Unsicherheiten der einzelnen Baumaßnahmen im Lebenszyklus addieren. Dies wird auch durch die Darstellung in Abbildung 6.18 oben deutlich, die die Lageparameter der Verteilungen in Bezug auf den Median des jeweiligen Analysejahres beschreibt. Über den Lebenszyklus nimmt die absolute Breite des 50 %- und 90 %-Konfidenzintervalls deutlich zu, genauso wie die Minimal- und Maximalwerte.

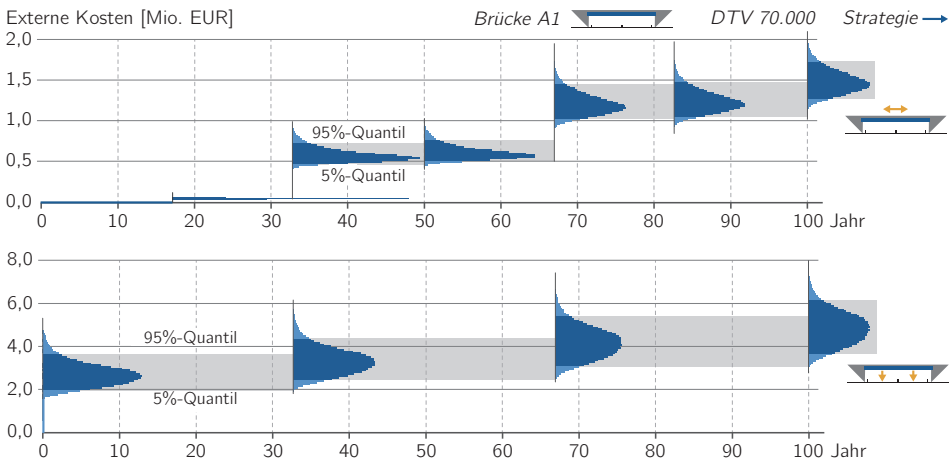


Abbildung 6.17: Ergebnisunsicherheiten dargestellt als Histogramme für Brücke A1 unterteilt nach Sachverhalten mit Kennzeichnung des zweiseitigen 90 %-Konfidenzintervalls

Die Boxplots der Abbildung 6.18 oben zeigen am Anfang des Lebenszyklus eine Lage der Mittelwerte geringfügig oberhalb der Mediane, so dass sich eine leicht rechtsschiefe Verteilung ergibt, die auch optisch erkennbar ist. Im Zuge der einzelnen Instandhaltungsmaßnahmen nähren sich die beiden Werte an und nach 100 Jahren sind Median und Mittelwert nahezu identisch. Das Ergebnis ist eine annähernd symmetrische Verteilung. Die Verteilungen lassen zwar eine Einschätzung der Ergebnisbandbreite zu, allerdings erlauben sie keinen Rückschluss darauf, welchen Einfluss die einzelnen Eingangsparameter auf das Gesamtergebnis haben. Hierzu wird eine globale Sensitivitätsanalyse mit dem Berechnungsprogramm SimLab, Version 2.2.1, durchgeführt, wobei dieselben mit Matlab, Release 2012a, erzeugten Eingangsdatenverteilungen verwendet werden wie bei den Monte-Carlo-Simulationen.

Die globale Sensitivitätsanalyse wird für die drei Kostenarten der externen Zeit-, Betriebs- und Umweltkosten zuerst getrennt durchgeführt und im Anschluss werden die externen Gesamtkosten analysiert. Die Berechnung bezieht sich jeweils auf eine Bauwoche des Sachverhalts der Autobahn und der Landesstraße. Als Ergebnis werden die Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten der zu der jeweiligen Kostenart zugehörigen Eingangsparameter ausgegeben. Für die unten liegende Autobahn sind die Ergebnisse in Abbildung 6.19 unter dem Ansatz einer Verkehrsführung mit 3+3 Fahrstreifen aufgeführt. Die Rangkorrelationskoeffizienten ergeben dabei in der Summe *nicht* eins, sondern weisen die Korrelation zwischen dem jeweiligen Rang der Eingangsparameter und dem Rang des Berechnungsergebnisses aus.

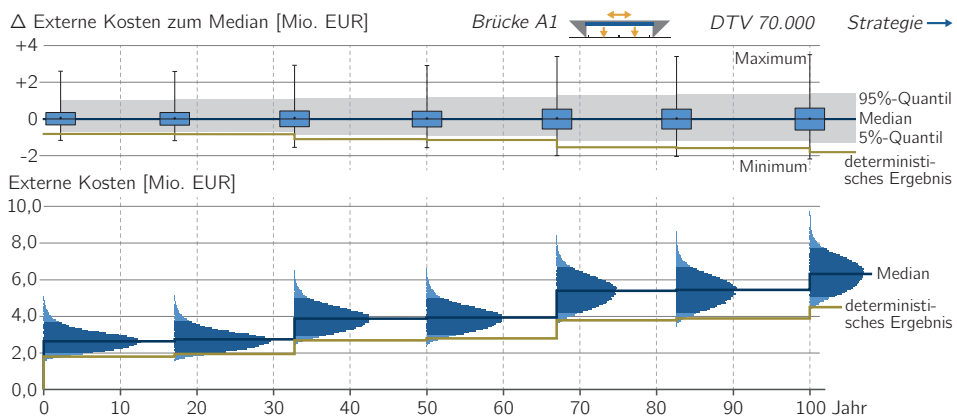


Abbildung 6.18: Ergebnisunsicherheiten dargestellt als Histogramme sowie deterministisches Ergebnis für die Brücke A1 (unten) und Lageparameter dargestellt als Boxplot (oben)

## 6 Anwendung

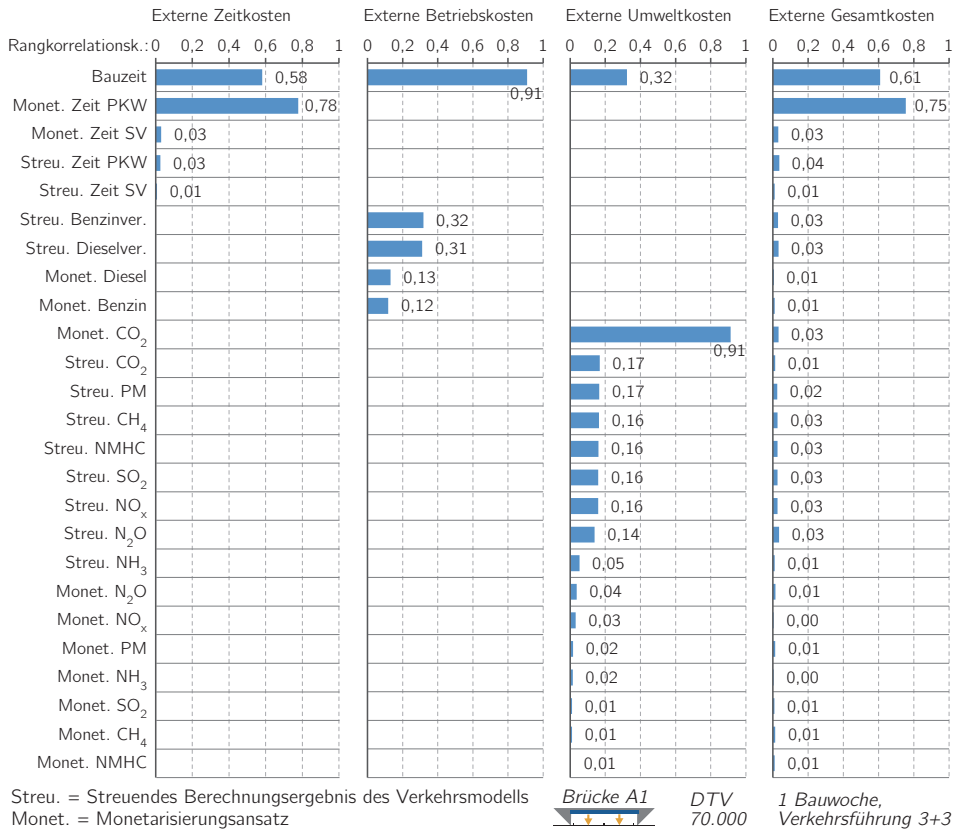


Abbildung 6.19: Spearmansche Rangkorrelationskoeffizienten aller Eingangsparameter für den unten liegenden Sachverhalt der Autobahn als Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse ausgewiesen für vier Kostenarten

Es ist erkennbar, dass die Bauzeit für alle drei Kostenarten eine wichtige Rolle spielt. Bei den externen Zeitkosten hat zusätzlich vor allem der Monetarisierungsansatz für PKW-Zeitkosten und bei den externen Umweltkosten der Monetarisierungsansatz für CO<sub>2</sub>-Emissionen eine große Bedeutung. Die externen Gesamtkosten korrelieren hingegen vor allem mit der Bauzeit und dem Monetarisierungsansatz für PKW-Zeitkosten. Dieses Ergebnis deckt sich mit den deterministischen Berechnungen in Abbildung 6.7, die eine Dominanz der externen Zeitkosten im Gesamtergebnis zeigen.

Da für die oben liegende Landesstraße ein unterschiedliches Berechnungsmodell verwendet wird, werden die Rangkorrelationskoeffizienten separat für eine Bauwoche und unter

### 6.3 A-Referenzbauwerke: Autobahn unten liegend

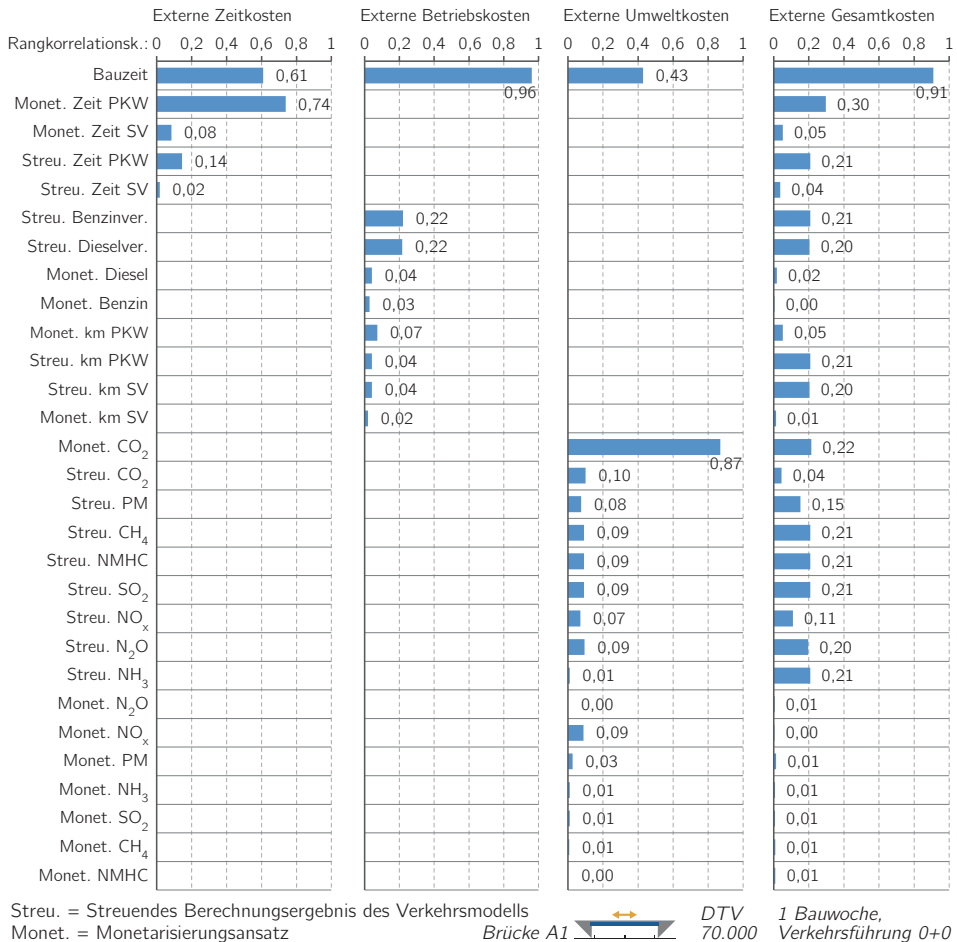


Abbildung 6.20: Spearmansche Rangkorrelationskoeffizienten aller Eingangsparameter für den oben liegenden Sachverhalt der Landesstraße als Ergebnisse der globalen Sensitivitätsanalyse ausgewiesen für vier Kostenarten

der Annahme einer vollständigen Sperrung der Landesstraße ausgewiesen. Die gefahrenen Mehrkilometer im Fall von Umleitungen führen zu zusätzlichen kilometerbezogenen Betriebskosten, deshalb enthält Abbildung 6.20 vier Eingangsparameter mehr, die zu den Ergebnissen des unten liegenden Sachverhalts der Autobahn keinen Beitrag leisten. Die sich ergebenden Rangkorrelationskoeffizienten weisen für die Landesstraße bei allen drei Kostenarten ein ähnliches Bild auf wie bei der Autobahn. Die externen Gesamtkosten

korrelieren wiederum stark mit der Bauzeit, allerdings zeigen eine Vielzahl zusätzlicher Variablen eine mittlere Korrelation mit dem Gesamtergebnis. Der Grund hierfür liegt in einer Korrelation der Eingangsvariablen, die streuenden Ergebnisse aus dem angewendeten Verkehrsmodell sind und mit „Streu.“ gekennzeichnet. Die Eingangsvariablenkorrelation ist in Abbildung 6.21 visualisiert und zeigt für beide dargestellten Sachverhalte ähnliche Zusammenhänge. Die Monetarisierungsansätze weisen kaum Korrelationen untereinander auf. Die Emissionen und zusätzlich die Kraftstoffverbräuche sind allerdings stark voneinander abhängig. Eine Ausnahme stellen beispielsweise die Schadstoffe  $NH_3$  für den unten liegenden Sachverhalt und  $NO_x$  für den oben liegenden Sachverhalt dar, die deutlich schwächer mit dem Kraftstoffverbrauch korrelieren. Als Gründe hierfür können unterschiedliche Einflüsse von PKW- und Schwerverkehrsemissionen sowie unterschiedlich große Unsicherheiten in den verwendeten Berechnungsansätzen angegeben werden.

Die Korrelation der Eingangsvariablen führt auch zu einer Beeinflussung der berechneten Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman, da sich bei einer Veränderung einer Variablen gleichzeitig weitere Variablen in dieselbe Richtung entwickeln und damit auch das Gesamtergebnis stärker verändert wird. Durch die Korrelation der Eingangsvariablen kann auch erklärt werden, warum in Abbildung 6.20 mehrere Schadstoffe und die Kraftstoffverbräuche denselben Rangkorrelationskoeffizienten bei der Analyse der externen Gesamtkosten aufweisen.

Nach der ausführlichen Analyse der Ergebnisunsicherheiten von Brücke A1 werden abschließend der Einfluss unterschiedlicher Autobahntypen sowie die Unsicherheiten der Brücken A2-V und A2-B dargestellt und mit den deterministischen Ergebnissen verglichen. Dabei findet keine genaue Ausweisung des gesamten Lebenszyklus mehr statt, es wird ausschließlich das Gesamtergebnis ausgegeben, siehe Abbildung 6.22. Die Fläche aller Häufigkeitsdichteverteilungen ist dabei immer gleich groß, da die verwendete Klassengröße der Histogramme und die jeweilige Skalierung der Abszisse aufeinander abgestimmt sind. Des Weiteren ist die Häufigkeitsverteilung als kumulierter Prozentanteil an der Gesamtsumme ausgewiesen, um die 5 % und 95 %-Quantile hervorzuheben.

Abbildung 6.22 links zeigt, dass mit abnehmendem DTV auch die absoluten Ergebnisbandbreiten abnehmen und sich alle Verteilungen für unterschiedliche Autobahntypen annähernd durch eine Standardnormalverteilung approximieren lassen. Dieselben Schlussfolgerungen können für die Ergebnisse der drei A-Brückentypen gezogen werden, wobei die Brücke A1 die kleinste Ergebnisbandbreite und die Brücke A2-B die größte Ergebnisbandbreite aufweist. Beim Vergleich der probabilistischen und deterministischen Ergebnisse zeigt sich ein einheitliches Bild bei allen untersuchten Szenarien.

### 6.3 A-Referenzbauwerke: Autobahn unten liegend

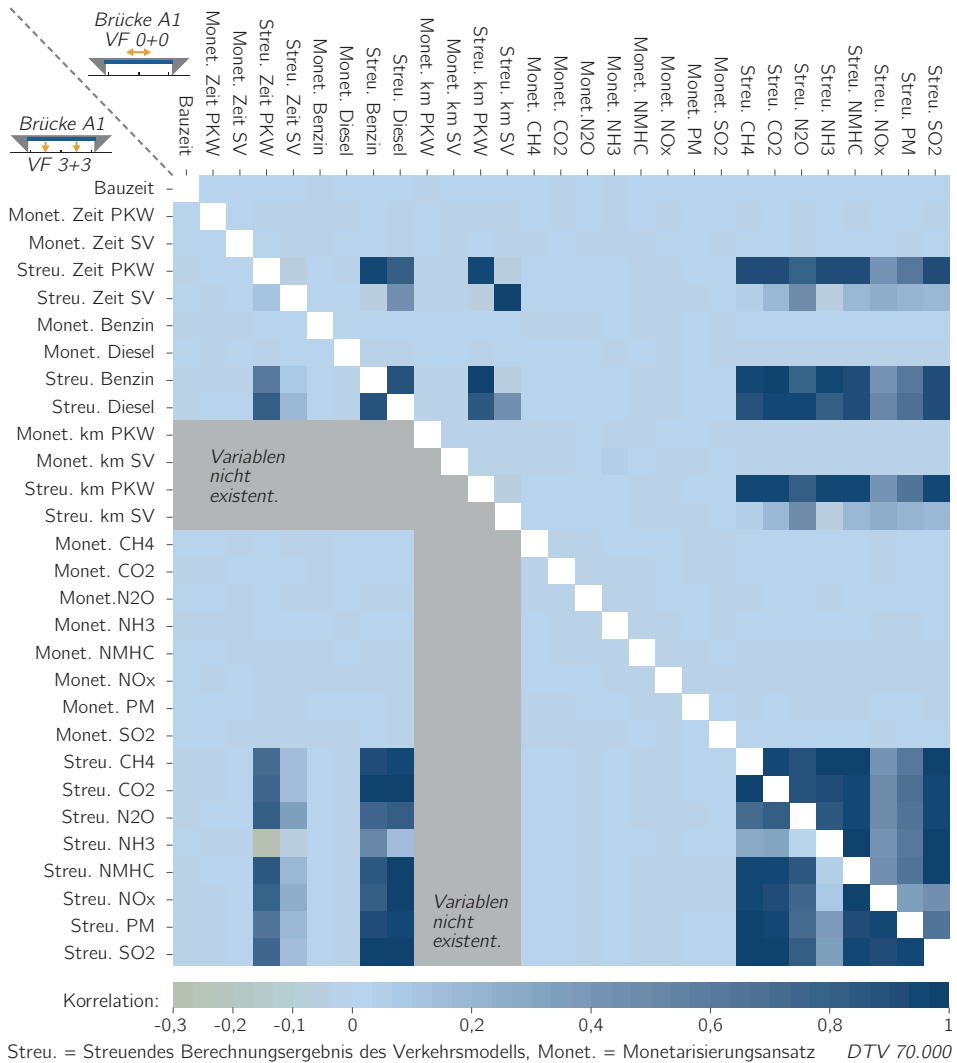


Abbildung 6.21: Korrelation der Eingangsvariablen verwendet für die globalen Sensitivitätsanalysen getrennt nach unten und oben liegendem Sachverhalt

In allen Fällen liegen die deterministischen Ergebnisse unterhalb des 5%-Quantilwertes der probabilistischen Berechnungen, auch für die nicht dargestellte Brücke A1 mit dem Autobahntyp der Pendlerautobahn. Wenn die deterministischen Ergebnisse als eine untere Schranke verstanden werden, können sie mit einem Signifikanzniveau von 5% ein-

gestuft werden, da mindestens 95 % der Ergebnisse unter Verwendung von streuenden Eingangsparametern oberhalb des deterministischen Ergebnisses liegen. Diese Aussage ist allerdings nur zutreffend, wenn die in dieser Arbeit hergeleiteten Ansätze verwendet werden, werden andere Eingangsparameter angesetzt, können sich abweichende Ergebnisse einstellen.

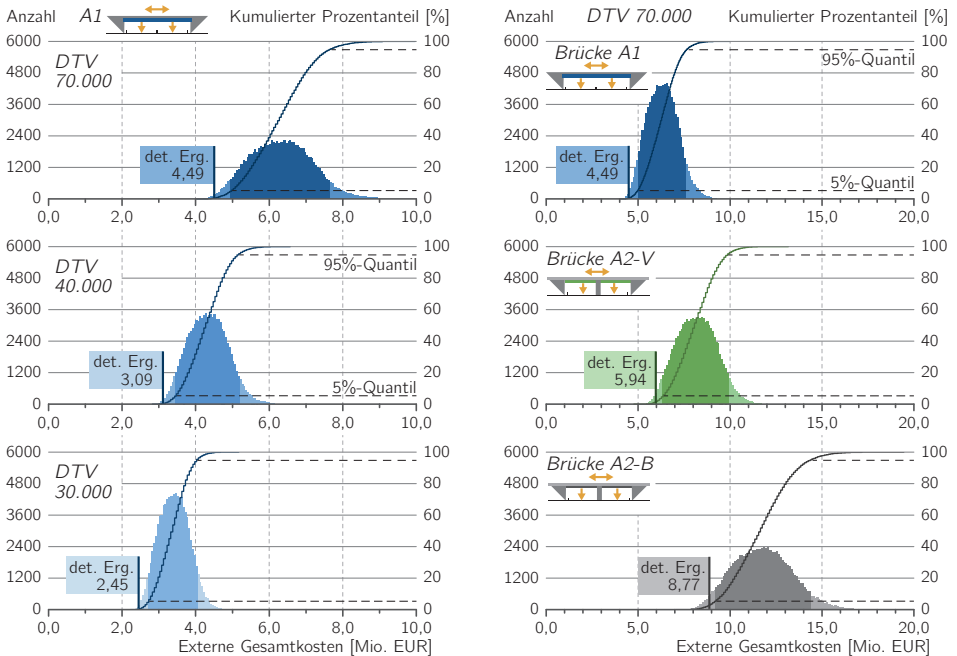


Abbildung 6.22: Ergebnisunsicherheiten dargestellt durch Häufigkeits- und Häufigkeitsdichteverteilungen für unterschiedliche Autobahntypen der Brücke A1 (links) und für verschiedene Brückenkonstruktionen (rechts), Vergleich mit den deterministischen Ergebnissen (det. Erg.)

### 6.3.2 Ergebnisse Ökobilanzierung

Im vorherigen Abschnitt sind alle externen Effekte monetarisiert und als externe Kosten ausgewiesen worden. Die externen Umwelteffekte können unter Verwendung der Methode der Ökobilanzierung allerdings auch als Auswirkungen in verschiedenen Wirkungskategorien dargestellt werden. Dieselben berechneten Emissionen aus dem Verkehrsmodell sind in beiden Fällen Grundlage für die Analysen, der Untersuchungsablauf und die Ergebnisdarstellung hingegen unterscheiden sich, siehe Vergleich in Abbildung 3.6.



Im Folgenden werden zunächst die Emissionen entstehend durch die Verkehrsbeeinträchtigung ökobilanziell bewertet und in den definierten Wirkungskategorien ausgewiesen. Im Anschluss wird eine Ökobilanz für die drei A-Brückentypen erstellt, wobei nur die Strategie der zustandsbestimmten Instandhaltung analysiert wird. Die Zusammenführung der Ergebnisse findet im folgenden Kapitel 7 statt. Die absoluten Ergebnisse sind in Anhang F.1 und F.2 ausgewiesen und können verwendet werden, wenn Vergleiche mit anderen Studien stattfinden sollen.

### **6.3.2.1 Externe Umwelteffekte: Konstruktionsvergleiche**

Die externen Umwelteffekte setzen sich aus den beiden Komponenten der Schadstoffemissionen aus Verkehr entstehend durch Kraftstoffverbrennung sowie externen Effekten entstehend durch die Bereitstellung der Kraftstoffe (vorgelagerte Prozesse) zusammen. Je nach untersuchter Wirkungskategorie sind die Beiträge der beiden Komponenten zu dem Gesamtergebnis unterschiedlich hoch. Für die Wirkungskategorie des Treibhauspotentials (GWP) tragen die Schadstoffemissionen zu 82 % und die Kraftstoffbereitstellung zu 18 % zum Gesamtergebnis bei. Für die Wirkungskategorien Versauerungspotential (AP) und Überdüngungspotential (EP) dreht sich das Verhältnis um, so dass das Gesamtergebnis zu ca. 30 % von Schadstoffemissionen und zu 70 % von Kraftstoffbereitstellung bestimmt wird. Die Ursachen hierfür liegen in dem unterschiedlichen Verbrennungsverhalten von Motoren bei verschiedenen Geschwindigkeiten.

Die absoluten Ergebnisse für die Wirkungskategorie Treibhauspotential (GWP) sind in Abbildung 6.23 für alle drei Referenzbrücken für den Typus der Grundlastautobahn gegenübergestellt, auf die unterschiedliche horizontale Skalierung für die Brücke A2-B ist dabei zu achten. Insgesamt ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der externen Kostenrechnung, allerdings hat vor allem für die Integralbrücke A1 die Nutzungsphase der oben liegenden Landesstraße einen deutlich höheren Einfluss auf das Ergebnis. Sobald in der Herstellungsphase Verkehrsstaus entstehen, ist eine deutliche Zunahme von Kraftstoffverbräuchen und Emissionen die Folge und die Herstellungsphase dominiert dann das Gesamtergebnis. Dies ist bei den beiden Zweifeldbrücken A2-V und A2-B der Fall.

Die Bedeutung der einzelnen Lebenszyklusphasen ist für die übrigen Wirkungskategorien vergleichbar mit den gezeigten Ergebnissen der Wirkungskategorie Treibhauspotential. Eine Ausnahme stellt das Überdüngungspotential (POCP) dar, bei dem die Auswirkungen in der Herstellungsphase für die Brücke A1 negative Werte annehmen, über den Lebenszyklus allerdings positiv sind. Dies bedeutet, dass potentielle Umweltwirkungen

während der Brückenherstellung durch die Einrichtung der Baustelle vermieden werden. Die Ursachen hierfür sind dieselben wie für die negativen externen Umweltkosten, die in Abbildung 6.14 dargestellt und erläutert werden. Bei den beiden Zweifeldbrücken tritt dieser Effekt nicht auf, da Verkehrsstaus entstehen und damit die Emissionen deutlich ansteigen.

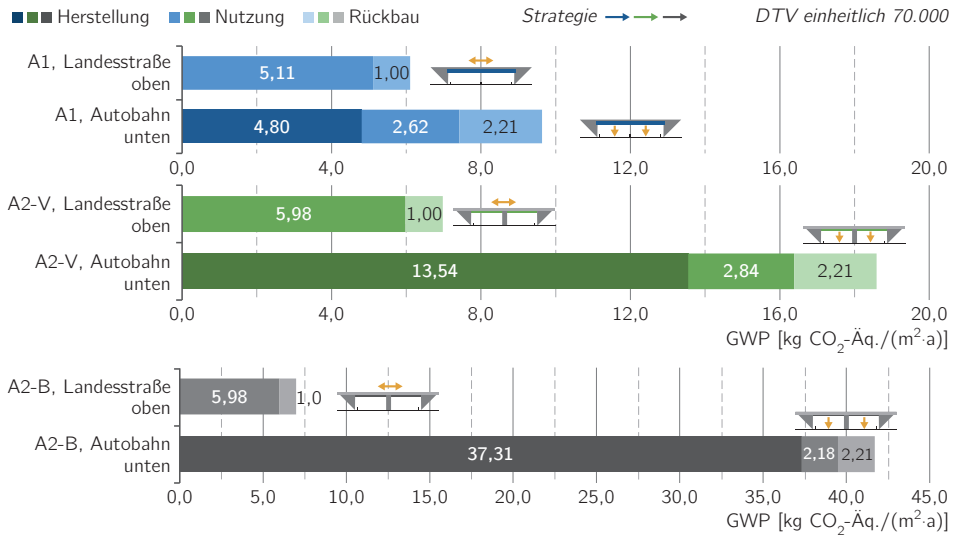


Abbildung 6.23: Vergleich der drei Konstruktionsarten der A-Referenzbauwerke hinsichtlich des externen Umwelteffekts Treibhauseffekt (Global Warming Potential, GWP) gegliedert nach oben und unten liegendem Sachverhalt in absoluten Zahlen

### 6.3.2.2 Externe Umwelteffekte: Autobahntypen

Die externen Umwelteffekte für die vier definierten Autobahntypen werden in der Wirkungskategorie Treibhauspotential (GWP) für die Brücke A1 verglichen. Die Ergebnisse sind getrennt für den oben und unten liegenden Sachverhalt in Abbildung 6.24 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass für einen DTV von 30.000 bzw. 40.000 Fahrzeugen pro Tag die oben liegende Landesstraße höhere Auswirkungen erzeugt als die entsprechende Autobahn. Bei der Grundlast- (DTV 70.000 Fz/Tag) und Pendlerautobahn (DTV 100.000 Fz/Tag) ist der unten liegende Sachverhalt für die höheren Auswirkungen verantwortlich.

Insgesamt reagiert bei Erfassung der externen Umwelteffekte in der Ökobilanz das Ergebnis sensibler auf die Änderung des Autobahntyps (Unterschied zwischen Pendler-

autobahn und Grundlastautobahn Faktor 8), als dies bei der externen Kostenrechnung der Fall ist (Unterschied zwischen Pendlerautobahn und Grundlastautobahn Faktor 6). Für die weiteren Wirkungskategorien zeigt sich verglichen mit dem Treibhauspotential ein vergleichbares Bild. Die relativen Ergebnisunterschiede der Autobahntypen liegen in derselben Größenordnung, wobei die Pendlerautobahn im Durchschnitt Auswirkungen erzeugt, die verglichen mit der Wochenendautobahn um den Faktor 10-15 höher sind. Eine Ausnahme stellt das Überdüngungspotential dar, bei dem die relativen Unterschiede deutlich größer sind und sich zwischen den Ergebnissen der Wochenend- und Pendlerautobahn ein Faktor von 42 ergibt.

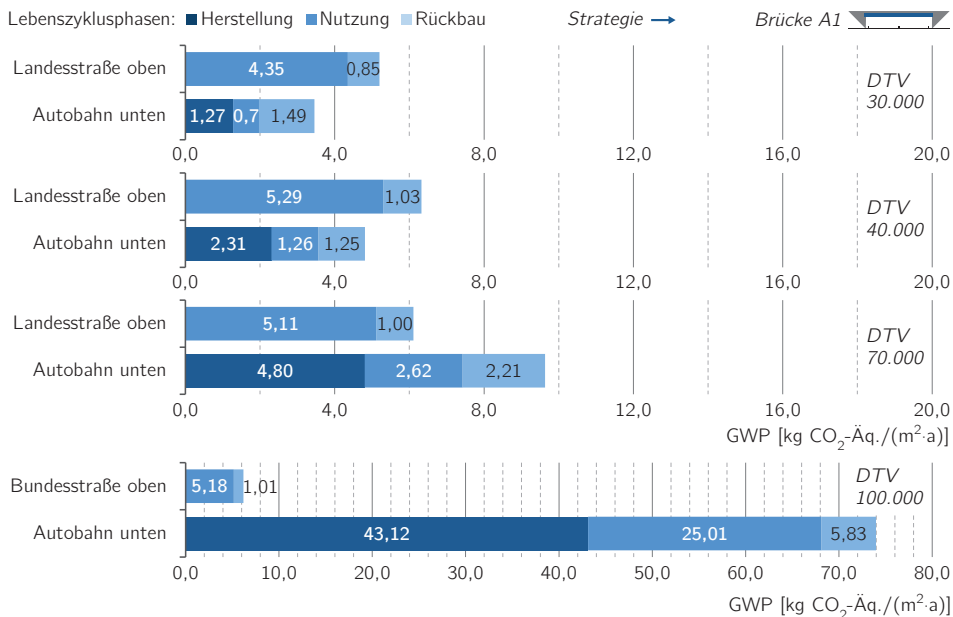


Abbildung 6.24: Vergleich der vier Autobahntypen hinsichtlich des externen Umwelteffekts Treibhausseffekt (Global Warming Potential, GWP) für Brücke A1 und gegliedert nach oben und unten liegendem Sachverhalt in absoluten Zahlen

### 6.3.2.3 Bauwerksebene: Konstruktionsvergleiche

Sämtliche potentiellen Umweltwirkungen, die im Lebenszyklus durch Materialproduktion, Erstellung, Instandhaltung und Rückbau der Brücken entstehen, werden in der bauwerksbezogenen Ökobilanz zusammengefasst. Hier werden nur die Ergebnisse in der Wir-

kungskategorie Treibhauspotential vorgestellt, eine vollständige Übersicht der absoluten Ergebnisse findet sich in Anhang F.2. Wie beschrieben werden die im Rahmen der Bautätigkeiten notwendigen Prozesse abgeschätzt, indem Erhöhungsfaktoren definiert werden, die auf die massenbasierten Ergebnisse angewendet werden. Die verwendeten Erhöhungsfaktoren sind in Tabelle 6.1 zusammengestellt, die Ableitung der Faktoren erfolgt auf Basis von FRIEDRICH et al. (2013) und GERVÁSIO (2010).

Tabelle 6.1: Erhöhungsfaktoren [-] anzuwenden auf die materialbezogenen Auswirkungen in den Wirkungskategorien zur Abschätzung der Bauprozesse in den einzelnen Lebenszyklusphasen

GWP	POCP	EP	AP	OPD	PE <sub>ne</sub>	PE <sub>ges</sub>
1,1	1,1	1,225	1,15	1,05	1,125	1,125

Abbildung 6.25 zeigt die Ergebnisse für die Wirkungskategorie Treibhauspotential. Die Herstellungsphase erzeugt dabei bei allen Bauwerken deutlich die höchsten Auswirkungen, gefolgt von der Nutzungsphase. Die Aufteilung nach Bauwerksgruppen ergibt, dass in der Herstellungsphase vor allem der Unterbau ergebnisrelevant ist, in der Nutzungsphase ist es der Ausbau. Das Recyclingpotential wird separat ausgewiesen.

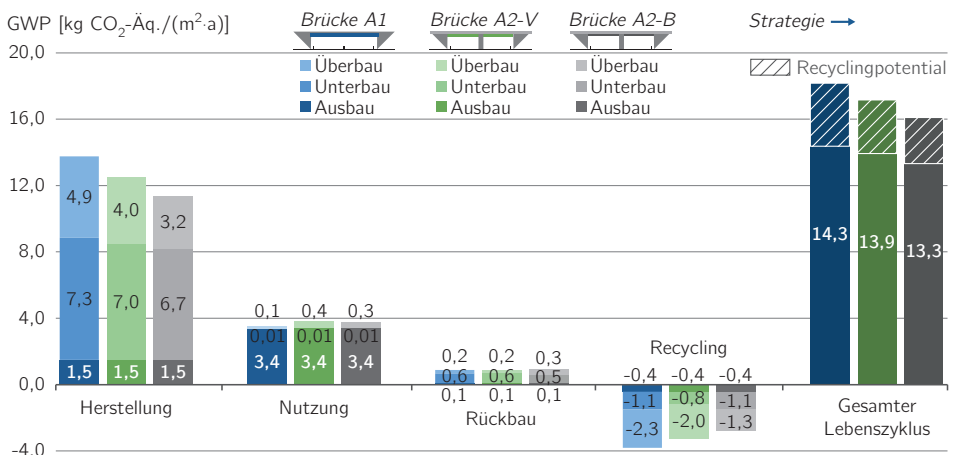


Abbildung 6.25: Vergleich der bauwerksbezogenen Auswirkungen in der Wirkungskategorie Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) für die drei A-Referenzbrücken unterschieden nach Lebenszyklusphasen und Bauteilgruppen

Vor allem Bauwerke mit einem hohen Stahlanteil im Überbau ermöglichen auch sehr hohe Gutschriften am Lebenszyklusende. Dies führt bei der Gesamtbetrachtung dazu, dass der Unterschied zwischen dem Integralbauwerk A1 und dem Stahlbetonbauwerk

A2-B bei 7 % liegt. Die Ergebnisse in den weiteren Wirkungskategorien werden für die Brücke A1 im folgenden Abschnitt vorgestellt.

### 6.3.2.4 Bauwerksebene: Wirkungskategorien

Zur Darstellung aller Wirkungskategorien werden die Ergebnisse aufgrund der deutlich unterschiedlichen absoluten Werte in prozentualer Form ausgewiesen, wobei jede Wirkungskategorie zu 100 % gesetzt wird. Die nach Lebenszyklusphasen aufgeschlüsselten Anteile zeigt Abbildung 6.26. Die Herstellungsphase verursacht in allen Wirkungskategorien mindestens 60 % der Auswirkungen, die Rückbauphase hat jeweils den kleinsten Anteil. Eine Ausnahme stellt das Ozonschichtabbaupotential (ODP) dar, das in der Recyclingphase positive Auswirkungen verursacht, während für die restlichen Wirkungskategorien in dieser Phase Gutschriften entstehen, die für die Integralbrücke A1 im Durchschnitt bei 20 % liegen.

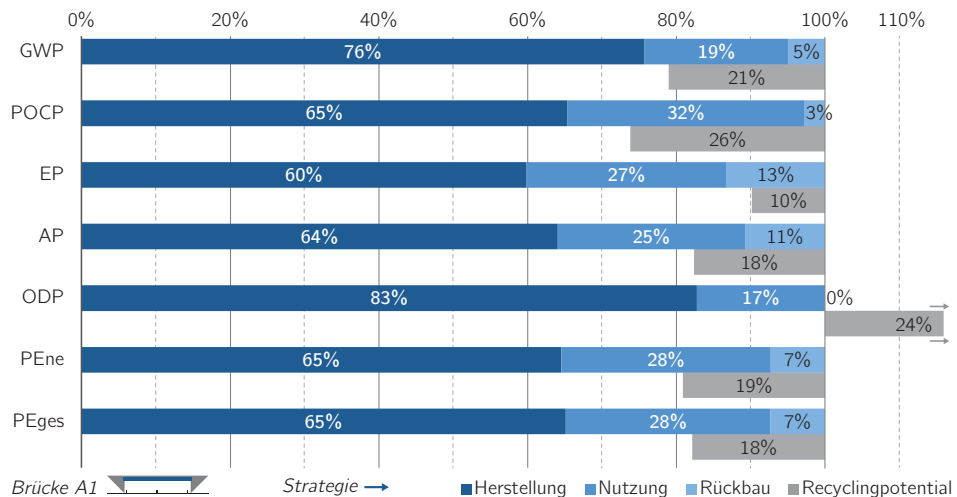


Abbildung 6.26: Gegenüberstellung der Ergebnisse der bauwerksbezogenen Auswirkungen in den untersuchten Wirkungskategorien für die Brücke A1, jede Wirkungskategorie ist auf 100 % skaliert, Unterscheidung nach Lebenszyklusphasen

Dieselben Ergebnisse können auch nach Bauteilgruppen aufgeschlüsselt werden, siehe Abbildung 6.27. Dabei haben die Bauteilgruppen Unterbau und Überbau in den meisten Wirkungskategorien ähnliche Anteile am Gesamtergebnis, Ausnahmen stellen das Ozonbildungspotential (POCP) und das Ozonschichtabbaupotential (OPD) dar. Die hohe Be-

deutung des Ausbaus beim POCP resultiert vorwiegend aus den Instandsetzungsmaßnahmen in der Nutzungsphase, in der der Überbau und Unterbau so gut wie keine potentiellen Umweltwirkungen erzeugen. Das ODP wird in der hier durchgeführten Analyse fast ausschließlich vom Überbau beeinflusst, wobei das Ergebnis maßgebend vom Eingangsdatensatz für die Stahlherstellung abhängt. Der verwendete EPD-Datensatz weist einen sehr hohen Wert bei ODP für Walzprofile aus, bei Verwendung eines alternativen Datensatzes würde sich das Ergebnis stark verschieben. Diese Abhängigkeit ist bei der Ergebnisdeutung unbedingt zu beachten.

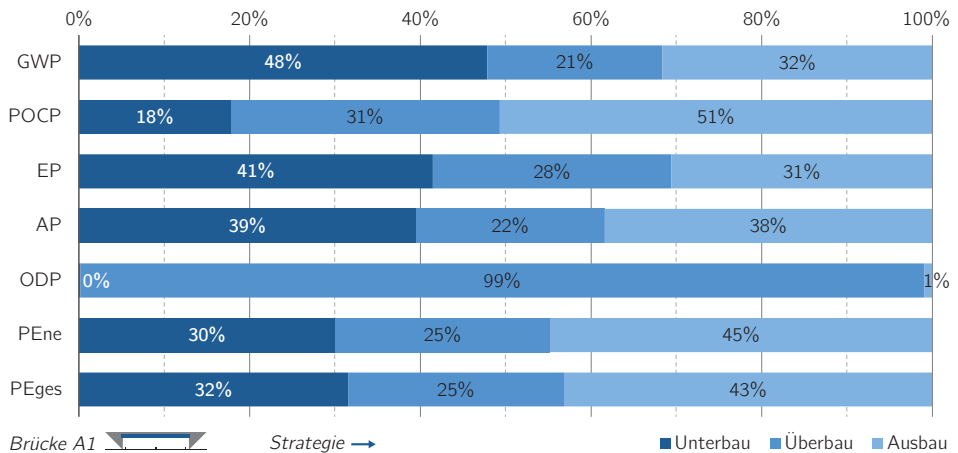


Abbildung 6.27: Gegenüberstellung der Ergebnisse der bauwerksbezogenen Auswirkungen in den untersuchten Wirkungskategorien für die Brücke A1, jede Wirkungskategorie ist auf 100 % skaliert, Unterscheidung nach Bauteilgruppen

Die vorgestellten Ergebnisse stellen verschiedene Umweltaspekte nebeneinander dar und sind bisher für bauwerksbezogene und externe Umwelteffekte getrennt ausgewiesen. Die Integration der Einzelaspekte ist für eine Entscheidungsunterstützung allerdings erforderlich und wird in Kapitel 7 diskutiert und angewendet.

### 6.3.3 Ergebnisse Lebenszykluskostenrechnung

Als dritte Methode wird die Lebenszykluskostenrechnung für die A-Referenzbrücken angewendet. Die Lebenszykluskosten beziehen sich ausschließlich auf die Bauwerke selber und beinhalten die zur Bauwerkserstellung erforderlichen Materialien, Geräte und Prozesse.

Zusätzlich werden für die Lebenszykluskosten Unsicherheiten analysiert, wobei die Untersuchungen auf lokalen Sensitivitätsanalysen basieren, bei denen jeweils ein Parameter variiert und die Änderung des Gesamtergebnisses dargestellt wird. Die untersuchten Parameter sind der Diskontierungszinssatz sowie die verwendeten Kostenansätze.

### 6.3.3.1 Herstellungskosten

Analog zu den Ökobilanzergebnissen werden die Herstellungskosten in die drei Bauteilgruppen Unterbau, Überbau und Ausbau unterteilt. Zusätzlich wird der Kostenblock „Temporär“ verwendet, der nicht den Bauteilgruppen zuordenbare Kosten enthält. Dies sind Kosten für Verkehrsführungen, Planungsleistungen und die Baustelleneinrichtung. Abbildung 6.28 beinhaltet die Berechnungsergebnisse und zeigt, dass vor allem die Herstellung der Überbauten zu Ergebnisunterschieden führt. Die Integralbrücke A1 verursacht aufgrund der fehlenden Mittelstütze sowohl im Über- als auch Unterbau gegenüber den Zweifeldbrücken höhere Kosten. Der Kostenanteil für den Ausbau ist bei allen Varianten identisch, da für alle Referenzbrücken dieselben Ausbaukomponenten zur Verbesserung der Ergebnisvergleichbarkeit angesetzt werden. Bei dem Stahlbetonbauwerk A2-B sind die deutlich höheren Kosten in der Gruppe Temporär auffällig, die durch die längere Bauzeit und den damit verbundenen Vorhaltekosten für Baustelleneinrichtung und Verkehrsführung zu begründen sind.

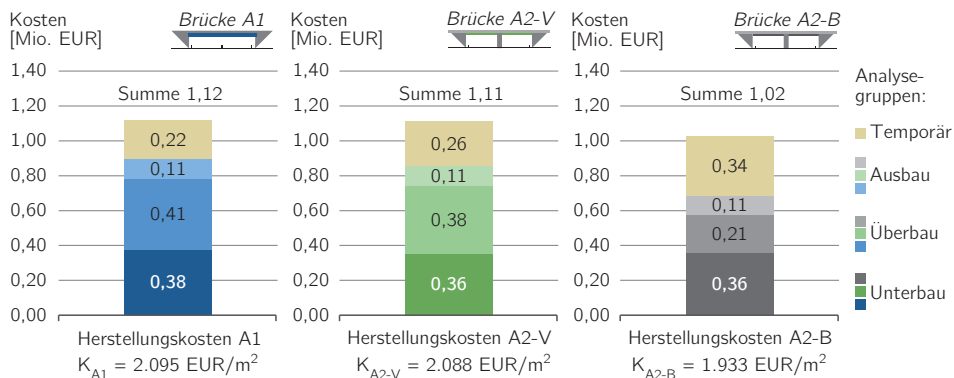


Abbildung 6.28: Vergleich der Herstellungskosten der Referenzbrücken, Unterteilung in Bauteilgruppen

In Abbildung 6.28 sind neben den absoluten Kosten auch die auf die Brückenfläche bezogenen Herstellungskosten genannt. Diese Werte liegen in derselben Größenordnung wie erhobene Erfahrungswerte aus der Praxis, die Ergebnisse sind damit repräsentativ.

### 6.3.3.2 Lebenszykluskosten

Im Rahmen der Lebenszykluskostenrechnung werden die Herstellungskosten berücksichtigt, sie werden allerdings nicht mehr explizit ausgewiesen, sondern bilden den Startpunkt für die im Folgenden präsentierten Verläufe. Die in Abbildung 6.29 gezeigten Lebenszykluskostenverläufe verwenden zur besseren Sichtbarkeit der Ergebnisse in der Nutzungsphase eine skalierte Vertikalachse mit einem Startpunkt bei einer Million Euro. Die Grundsteigung der Verläufe entsteht dabei durch die dreijährlich stattfindenden Inspektionsmaßnahmen. Die zunehmende Abflachung über die Nutzungsjahre resultiert aus dem verwendeten realen Diskontierungszinssatz von 2 %. Die Diskontierung führt dazu, dass Maßnahmen, die spät im Lebenszyklus stattfinden, einen deutlich kleineren Beitrag zu den Lebenszykluskosten leisten als Maßnahmen am Lebenszyklusanfang.

Die Analyse der Nutzungsphase ermöglicht die Gegenüberstellung verschiedener Instandhaltungsstrategien. Dabei zeigt sich für die Referenzbrücke A1, dass am Lebenszyklusende die gezielte Alterung bezogen auf die bauwerksbezogenen Kosten am besten abschneidet, gefolgt von der zustandsbestimmten Strategie und der Präventivstrategie. Allerdings muss für eine Strategiebeurteilung zusätzlich beachtet werden, dass alle drei Strategien zu unterschiedlichen theoretischen Zustandsnoten am Lebenszyklusende führen, so wie es auch in Abbildung 4.3 qualitativ dargestellt wird. Damit erlaubt die Präventivstrategie aufgrund einer guten theoretischen Zustandsnote eine Verlängerung des Lebenszyklus bei Weiterführung der Instandhaltungsmaßnahmen, während die gezielte Alterung nach 100 Jahren

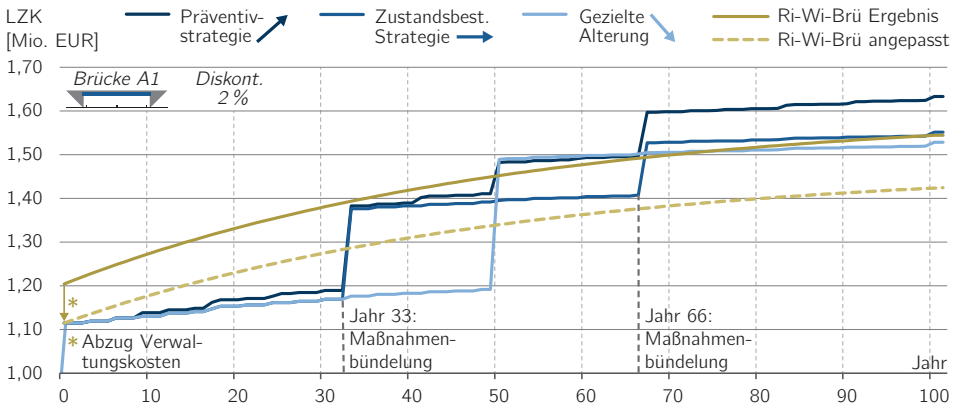


Abbildung 6.29: Lebenszykluskosten der Referenzbrücke A1 mit Vergleich der Instandhaltungsstrategien und Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der RI-WI-BRÜ (2007)



zu einer sehr schlechten theoretischen Zustandsnote führt und damit fast zwangsläufig ein Ersatzneubau erforderlich ist. Die verschiedenen Strategien ermöglichen damit am Lebenszyklusende unterschiedliche Optionen zur Weiterführung des Brückenbetriebs.

Ergänzend zu den Ergebnissen basierend auf den jahresgenauen Erneuerungszyklen der einzelnen Bauteilgruppen ist das mit dem pauschalen Instandhaltungskostenansatz der RI-WI-BRÜ (2007) berechnete Ergebnis in Abbildung 6.29 dargestellt. Dabei wird der Ansatz für einen Stahlbetonrahmen mit jährlich 0,8 % der Herstellungskosten verwendet, da in der Ri-Wi-Brü keine Angaben zu Stahlverbundbrücken enthalten sind. Es ist zu beachten, dass die Ri-Wi-Brü unterschiedliche Systemgrenzen annimmt und standardmäßig Verwaltungskosten i. H. v. 10 % miteinbezieht. Für einen korrekten Vergleich müssen diese herausgerechnet werden, so dass bei der Verwendung der gestrichelten Linie einheitliche Systemgrenzen vorliegen. Es ist zu erkennen, dass bei Rahmenbauwerken die tatsächlich entstehenden Lebenszykluskosten von der Ri-Wi-Brü unterschätzt werden. Bezogen auf die zustandsbestimmte Instandhaltungsstrategie findet eine Unterschätzung von 8 % statt, was in einer annehmbaren Größenordnung liegt, wenn beachtetet wird, dass die Ri-Wi-Brü als in der Praxis einfach anzuwendendes Berechnungsinstrument geschaffen wurde.

Für die Referenzbrücke A2-V findet hingegen eine Überschätzung bezogen auf die zustandsbestimmte Strategie bei Anwendung der Ri-Wi-Brü statt und bei der Stahlbetonbrücke A2-B wird der Wert der Lebenszykluskosten vergleichsweise gut abgeschätzt, siehe Abbildung 6.30. Der Sprung in dem Kostenverlauf wird durch eine nach der Richtlinie

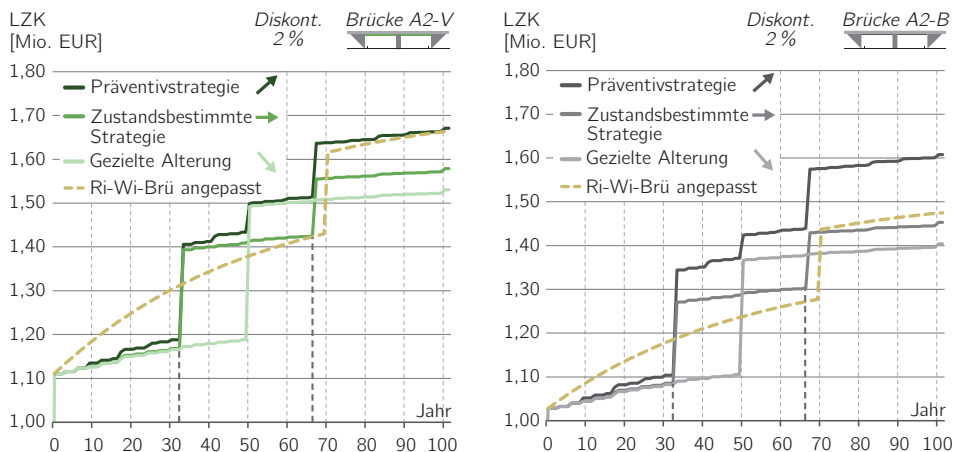


Abbildung 6.30: Lebenszykluskosten der Referenzbrücke A2-V (links) und A2-V (rechts) mit Vergleich der Instandhaltungsstrategien und Gegenüberstellung mit den Ri-Wi-Brü-Ergebnissen

anzusetzenden Überbauerneuerung nach 70 Jahren bedingt. Die unterschiedlichen Abweichungen der Gesamtergebnisse zeigen, dass die Ri-Wi-Brü im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen nur bedingt einsetzbar ist, vor allem wenn mit weiteren Bewertungskategorien verrechenbare Ergebnisse erzeugt werden sollen.

Der Strategievergleich ergibt für die Brücken A2-V und A2-B dieselbe Ergebnisreihenfolge wie für die Brücke A1, die absoluten Unterschiede der Lebenszykluskosten nach 100 Jahren sind aber verschieden. Dies liegt einerseits an den konstruktionsabhängigen Instandhaltungsmaßnahmen und andererseits an dem Zeitpunkt der Maßnahmen im Lebenszyklus. Wenn wie bei Stahlbetonbrücke A2-B zu einem vergleichsweise frühen Zeitpunkt nach 33 Jahren im Rahmen der Präventivstrategie eine Betoninstandsetzung durchgeführt wird, hat dies einen deutlich größeren Einfluss auf die Höhe der Lebenszykluskosten als eine entsprechende Maßnahme im Jahr 66. Insgesamt wird empfohlen, einen Vergleich von Instandhaltungsstrategien immer fallbezogen durchzuführen.

### 6.3.3.3 Unsicherheiten

Die Unsicherheitsanalysen für die Lebenszykluskostenrechnung beziehen sich nur auf Unsicherheiten, die durch eine Variation des realen Diskontierungszinssatzes und der Kostenansätze entstehen. Aspekte wie Massenunsicherheiten und unterschiedlich lange Bauzeiträume sind nicht Bestandteil der Analysen. Abbildung 6.31 quantifiziert die Unsicherheiten, die aus diesen beiden Parametern entstehen. Für die Wahl des Diskontierungszinssatzes empfiehlt die Ri-Wi-Brü einen Wert von 3 %, es wird teilweise allerdings ein geringerer Diskontierungszinssatz verwendet, um die Bedeutung der Kosten im Lebenszyklus nicht zu stark herabzusetzen. Die Ergebnisbandbreite bei drei verschiedenen Diskontierungszinssätzen von 1,5 %, 2 % und 3 % ist in Abbildung 6.31 links dargestellt. Je geringer dabei der Wert ist, desto mehr Bedeutung erlangen die in der Nutzungs- und Rückbauphase entstehenden Kosten im Verhältnis zu den Herstellungskosten.

Abbildung 6.31 rechts quantifiziert die Unsicherheiten, die aus verschiedenen Kostenansätzen entstehen, wobei der mittlere Diskontierungszinssatz von 2 % zur Anwendung kommt. Dabei wird für alle verwendeten Kostenansätze gleichzeitig ein maximaler, mittlerer oder minimaler Wert angenommen, die verwendeten Massen und Prozesse bleiben identisch. Das Ergebnis ist eine Bandbreite der Lebenszykluskosten, die beim Referenzbauwerk A1 von 1,9 bis 1,4 Millionen Euro reicht. Diese Werte werden aber nicht mit derselben Wahrscheinlichkeit erreicht. Die Werte um den Mittelwert 1,55 Millionen Euro herum haben eine deutlich höhere Eintrittswahrscheinlichkeit. Über die genaue Verteilungsfunktion

kann bei Anwendung der lokalen Sensitivitätsanalyse keine Aussage gemacht werden, allerdings kann von einer rechtsschiefen Wahrscheinlichkeitsverteilung ausgegangen werden, bei der die Abweichungen nach oben deutlich größer sind als die nach unten. Für die Brücke A2-B ergeben sich ähnliche Bandbreiten bei Variation der Kostenansätze, wobei die Abweichungen nach oben mit +20 % geringer ausfallen als bei der Brücke A1.

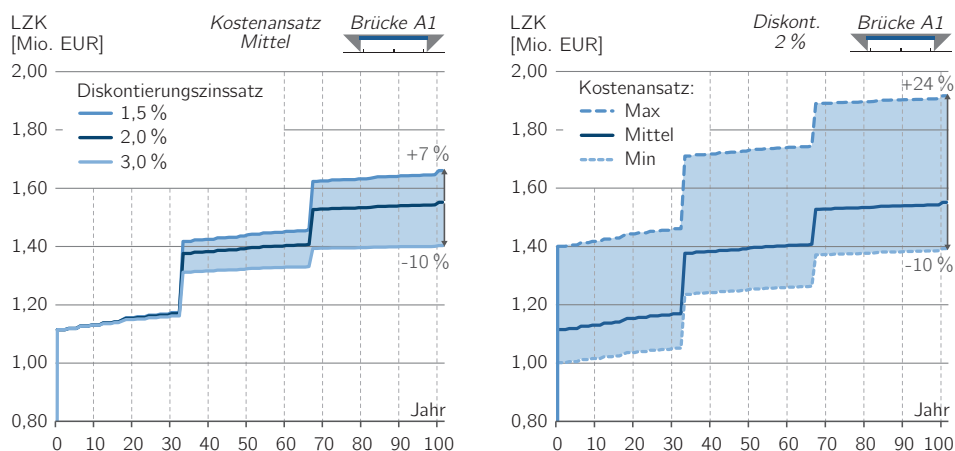


Abbildung 6.31: Ergebnisunsicherheit der Lebenszykluskostenrechnung der Referenzbrücke A1, Parametervariation des realen Diskontierungszinssatzes (links) und der Kostenansätze (rechts)

Abschließend werden die Ergebnisse der Lebenszykluskosten der drei A-Referenzbrücken gegenübergestellt und Ergebnisunsicherheiten entstehend aus dem maximalen, mittleren und minimalen Kostenansätzen ausgewiesen. Für die drei Brücken stellen sich dabei in etwa gleiche Ergebnisbandbreiten ein, deutliche Abweichungen für eine Brückenvariante sind nicht zu erkennen. Als Diskontierungszinssatz wird einheitlich ein Wert von 2 % verwendet, ein höherer oder niedrigerer Wert führte zu einer Verschiebung aller Ergebnisse nach oben oder unten. Eine Einteilung in Lebenszyklusphasen wird in Abbildung 6.32 nicht vorgenommen, die vorhergehenden Analysen zeigen aber, dass im Mittel 70 % der Lebenszykluskosten in der Herstellungsphase erzeugt werden und 30 % auf die Nutzungs- und Rückbauphase entfallen. Damit ergibt sich eine im Vergleich zum Büro- und Verwaltungsbau deutlich unterschiedliche Verteilung der Kosten im Lebenszyklus, da für den Hochbau grob von einer Verteilung von Herstellungs- zu Nutzungsphase von 20 % zu 80 % ausgegangen wird (BMVBS 2013b).

In Abbildung 6.32 sind zudem die Auswirkungen von verschiedenen Instandhaltungsstrategien dargestellt. Die Präventivstrategie führt dabei bei allen Brücken im Vergleich zu

der zustandsbestimmten Strategie zu höheren Lebenszykluskosten, die gezielte Alterung durchgehend zu geringeren Lebenszykluskosten. Auffällig ist, dass die prozentualen Unterschiede bei der Stahlbetonbrücke A2-B doppelt so hoch sind wie bei der Integralbrücke A1. Die Ursache liegt in den konstruktionsvariantenabhängigen Instandhaltungsmaßnahmen.

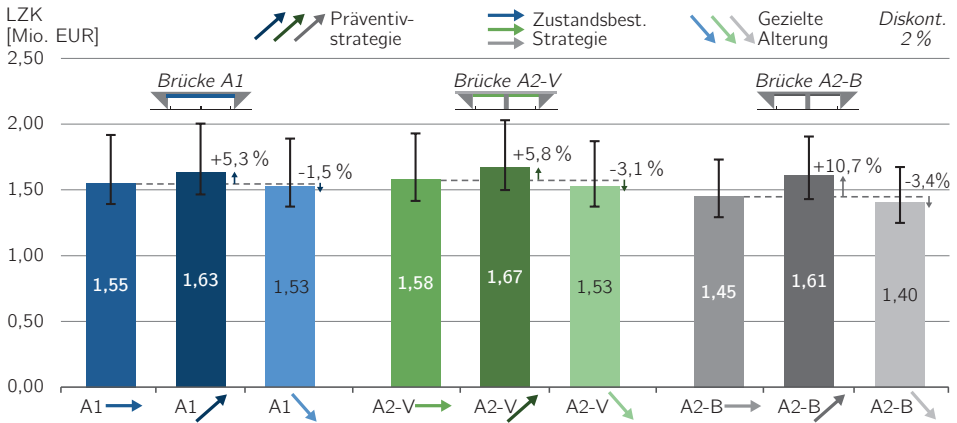


Abbildung 6.32: Ergebnisse und Unsicherheiten der Lebenszykluskostenrechnung für die drei A-Brücken mit Gegenüberstellung der Instandhaltungsstrategien, die Whisker kennzeichnen die Ergebnisse bei Verwendung von Maximal- und Minimalansätzen

## 6.4 B- und C-Referenzbauwerke: Autobahn oben liegend

Die beiden abschließend untersuchten Referenzbauwerke unterscheiden sich von den A-Brücken deutlich, da die Autobahn jeweils über die Brücke geführt wird und damit im Vergleich zu den A-Brücken unterschiedliche Instandhaltungsmaßnahmen die externen Kosten der Autobahn beeinflussen, wie beispielsweise die Erneuerung von Fahrbahnübergängen. Ein unten liegender Sachverhalt, der externe Kosten verursacht, existiert bei den B- und C-Brücken nicht. Aus konstruktiver Sicht müssen die deutlich größeren Stützweiten beachtet werden und es erfolgt die Ausbildung von zwei getrennten Stahlverbund-Hohlkästen. Alle Berechnungen beziehen beide Überbauten mit ein.

Die im Folgenden aufgeführten Ergebnisse sollen vor allem Größenordnungen verdeutlichen und werden daher verglichen mit den Auswertungen der A-Brücken deutlich kompakter dargestellt. Der Schwerpunkt wird auf die externen Kosten und Lebenszyklus-

kosten gelegt, ökobilanzielle Untersuchungen zu den Brücken B und C werden im Forschungsprojekt „NaBrü“ durchgeführt (KUHLMANN et al. 2011). Beide Referenzbrücken werden zusammen diskutiert, sie dürfen aber nicht als Varianten verstanden werden, da die Bauaufgabe beider Brücken verschieden ist und die beiden Bauwerke damit nicht gegenseitig substituierbar sind.

#### **6.4.1 Ergebnisse externe Kostenrechnung**

Die zur Berechnung der externen Kosten verwendeten Bauzeiten und Verkehrsführungen sind in Anhang D.2 und D.3 zusammengestellt und gehen von dem Szenario aus, dass immer eine Verkehrsführung über ein Teilbauwerk möglich ist. Dabei wird bevorzugt eine  $4s+0$  Verkehrsführung angesetzt, bei der Baumaßnahmen ungestört an dem jeweils nicht genutzten Teilbauwerk durchführbar sind. Bei einer  $3s+1$  Verkehrsführung müsste genauso wie bei der  $4s+0$  Verkehrsführung eine Verschwenkung eines Teils des Verkehrs auf die Gegenfahrbahn erfolgen, gleichzeitig verlängert sich die nach dem BZK (2009) anzusetzende Bauzeit, so dass hierdurch keine Vorteile und ggf. sogar Nachteile für die Höhe der resultierenden externen Kosten entstehen.

Da es sich bei den B- und C-Referenzbauwerken um Brücken mit regulär zwei Fahrstreifen pro Überbau bzw. Fahrtrichtung handelt, werden nur die Verkehrsbelastungen der Land- und Wochenendautobahn untersucht. Der Autobahntyp der Grundlastautobahn führte aufgrund des deutlich höheren DTV in Spitzenstunden auch ohne Baustelle schon zu Verkehrsstaus, so dass bei einer zusätzlichen Kapazitätsreduzierung sehr hohe externe Kosten entstünden.

##### **6.4.1.1 Ergebnisbeeinflussende Komponenten**

Die externen Kosten entstehend im gesamten Lebenszyklus werden in Abbildung 6.33 unterteilt nach den drei untersuchten Kostenarten aufgeschlüsselt. Dabei ergibt sich für beide Brückentypen, dass das Gesamtergebnis fast ausschließlich von externen Zeitkosten bestimmt wird, externe Betriebskosten spielen eine untergeordnete Rolle. Die externen Umweltkosten nehmen in der Summe negative Werte an, die Ursache hierfür liegt in dem reduzierten Schadstoffausstoß, der durch die Geschwindigkeitsbegrenzung im Baustellenbereich auf 80 km/h gegenüber der freien Fahrt ohne Baustellensituation entsteht. Die Höhe der negativen externen Umwelteffekte hat für das Gesamtergebnis allerdings keine Bedeutung.

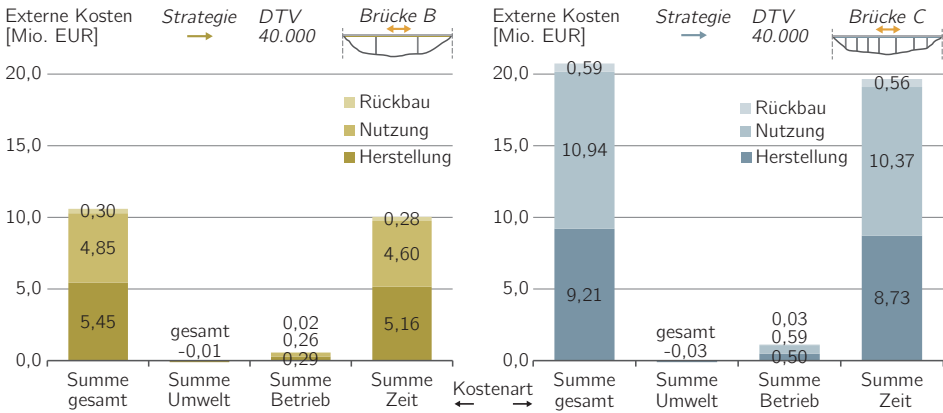


Abbildung 6.33: Externe Kosten der Referenzbrücken B (links) und C (rechts) unterteilt nach Kostenarten und ausgewiesen für alle Lebenszyklusphasen

In Bezug auf die Bedeutung der einzelnen Lebenszyklusphasen sind für die Referenzbrücken B und C Verschiebungen zu erkennen. Bei der deutlich längeren Brücke C hat die Nutzungsphase einen im Vergleich zur Herstellungsphase leicht höheren Anteil am Gesamtergebnis. Die Rückbauphase spielt bei beiden Brücken eine untergeordnete Rolle, was dadurch bedingt ist, dass in dem verwendeten Szenario während des Rückbaus immer eine Verkehrsführung über einen Überbau ermöglicht wird.

### 6.4.1.2 Konstruktionsvergleiche

In der Übersicht der untersuchten Referenzbrücken in Abbildung 6.2 werden für die Brücken B und C zwei Ausführungsvarianten aufgeführt. Den Einfluss dieser Varianten auf die Entwicklung der externen Gesamtkosten im Lebenszyklus ist in Abbildung 6.34 zusammengestellt. Eine Ausführung von Finger-Fahrbahnübergängen und Kalottenlagern in der Variante B-I hat eine geringfügige Verbesserung der externen Gesamtkosten von 1,5% zum Ergebnis. Die Variante C-WT, welche anstatt eines organischen Korrosionsschutzsystems WT-Stahl verwendet, führt zu einem Vorteil von ca. 10%. Für beide Varianten entstehen die Vorteile dabei in der Nutzungsphase, die Auswirkungen in der Herstellungsphase sind identisch mit denen der Ausgangskonstruktionen.

Die Ursache für die vergleichsweise große Vorteilhaftigkeit der Ausführungsvariante C-WT wird in Abbildung 6.35 gezeigt. Für Arbeiten am Hohlkasten ist vor allem bei hohen Talbrücken ein Zugang über die Brücke notwendig, was die Einrichtung von einer

## 6.4 B- und C-Referenzbauwerke: Autobahn oben liegend

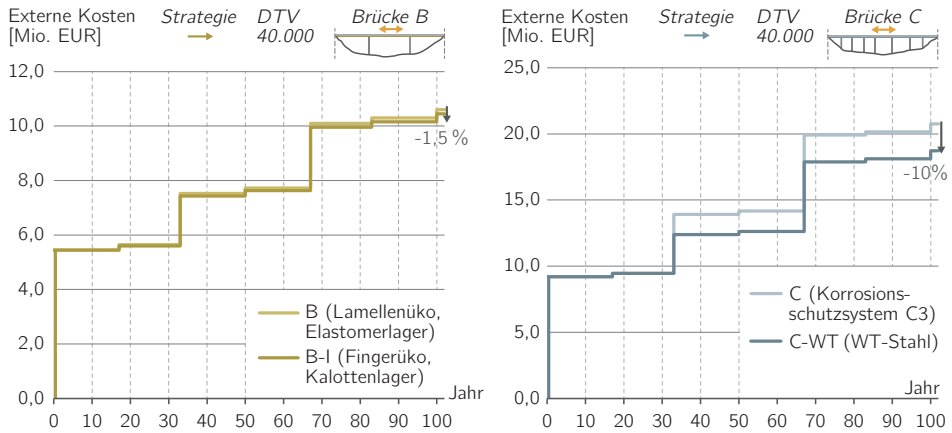


Abbildung 6.34: Konstruktionsvergleich der externen Kosten für Ausführungsvarianten von Referenzbrücke B (links) und C (rechts)



Abbildung 6.35: Sanierung der Hohlkästen einer Spannbetonbrücke und erforderliche Verkehrsführung 2+2 der oben liegenden Autobahn

2n+2 bzw. 2+2 Verkehrsführung erforderlich macht. Die Einrichtung einer Baustelle und der damit verbundenen Geschwindigkeitsbegrenzung führt dazu, dass Zeitverluste

des Verkehrs in dem Zeitraum entstehen, der für die Erneuerung des Korrosionsschutzes benötigt wird. In der zustandsbestimmten Strategie wird aufgrund der Brückenlänge der Zeitraum von jeweils 31 Wochen im Jahr 33 und 66 für die Erneuerung des Korrosionsschutzsystems angesetzt. Die entstehenden Zeitverluste fallen bei der in WT-Stahl ausgeführten Variante nicht an. Staueffekte entstehen bei dieser vergleichsweise geringen Kapazitätsreduzierung nicht.

Vor allem durch den Vergleich der Brücke B mit der Variante B-I wird deutlich, dass die Instandhaltungsmaßnahmen in der Nutzungsphase nicht unabhängig voneinander analysiert werden sollten. Da die Lamellen-Fahrbahnübergänge zusammen mit der Maßnahme der Fahrbahnbelagserneuerung ausgetauscht werden, hat eine Verlängerung der Lebensdauer des Fahrbahnüberganges (erreicht durch den Einsatz von Finger-Fahrbahnübergängen) nur eine geringe Auswirkung auf die Höhe der externen Kosten. Die Abstimmung bzw. Bündelung von Maßnahmen und die dadurch erreichte Bauzeitverkürzung ist damit ein effektiver Weg zur Reduzierung externer Effekte.

### 6.4.1.3 Instandhaltungsstrategien und Autobahntypen

Den bisher analysierten externen Kosten liegt durchgehend die zustandsbestimmte Strategie zu Grunde, eine Gegenüberstellung der Auswirkungen aller drei definierten Instandhaltungsstrategien findet sich in Abbildung 6.36. Wie bei den A-Brücken ist auch für die beiden Talbrücken die zustandsbestimmte Strategie in Bezug auf die externen Gesamtkos-

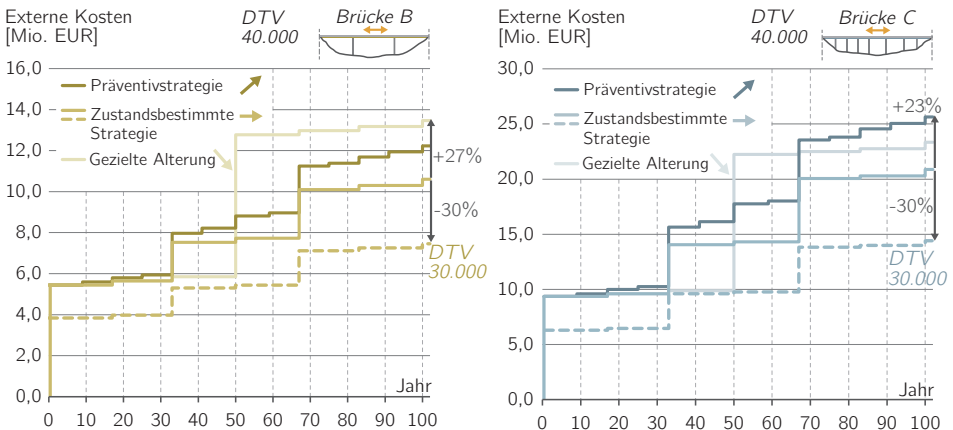


Abbildung 6.36: Externe Kosten von Instandhaltungsstrategien für Brücke B (links) und C (rechts)



ten die vorteilhafteste Strategie. Für die B-Brücke führt die Strategie der gezielten Alterung zu einer deutlichen Steigerung der externen Kosten um 27 %, bei der C-Brücke ist die maximale Steigerung bei Anwendung der Präventivstrategie mit 12 % deutlich geringer.

Abbildung 6.36 enthält zusätzlich den Verlauf der zustandsbestimmten Strategie für den Autobahntyp der Wochenendautobahn mit einem DTV von 30.000 Fz/Tag. Im Vergleich zur Landautobahn verringern sich die externen Gesamtkosten dabei um 30 %. Diese Verringerung resultiert überwiegend aus der geringeren Verkehrsbelastung der Wochenendautobahn. Weitere, allerdings in der Bedeutung deutlich geringere, Unterschiede entstehen durch die unterschiedlichen Verkehrsganglinien und Schwerververkehrsanteile.

### 6.4.1.4 Unsicherheiten

Die Analyse der externen Kosten für die Referenzbrücken B und C schließt mit der Darstellung der Ergebnisunsicherheiten in Abbildung 6.37 ab. Dabei finden – analog zu den Analysen der A-Referenzbrücken – die in den vorherigen Kapiteln hergeleiteten Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen Verwendung.

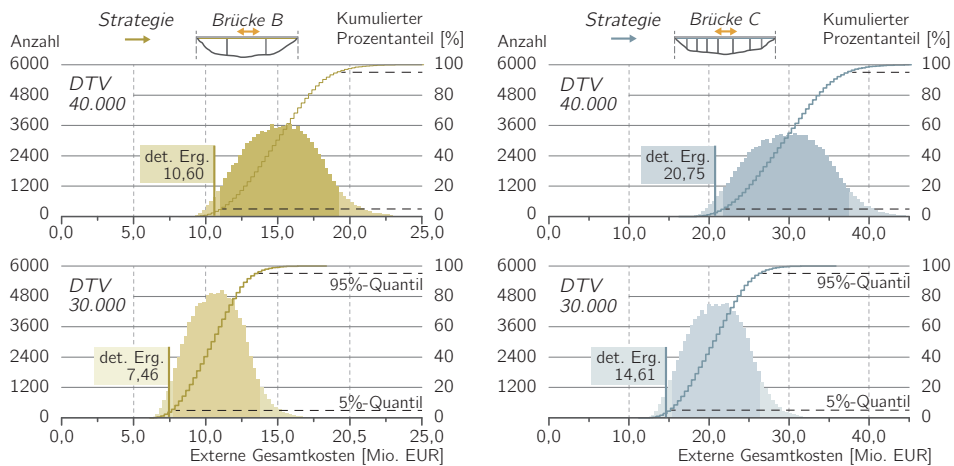


Abbildung 6.37: Ergebnisunsicherheiten der Brücke B (links) und C (rechts) dargestellt durch Häufigkeits- und Häufigkeitsdichteverteilungen für die Land- und Wochenendautobahn sowie Gegenüberstellung mit den deterministischen Ergebnissen (det. Erg.)

Die Häufigkeitsdichteverteilungen beider Brückentypen und Verkehrssituationen ergeben annähernd dieselbe Verteilungsform, die sich mit einer Normalverteilung approximieren

lässt. Die gekennzeichneten 5 % und 95 %-Quantile weisen im oberen Quantil eine leicht erhöhte Bandbreite auf. Beim Vergleich mit den deterministischen Ergebnissen zeigt sich, dass diese innerhalb der 5 %-Quantile der probabilistischen Analysen liegen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die deterministischen Ergebnisse mit einem Signifikanzniveau von 5 % als untere Schranke der möglichen Ergebnisse bei Berücksichtigung von Unsicherheiten eingestuft werden können. Wie auch bei den A-Brücken wird dieses Ergebnis maßgebend von der Verwendung eines minimalen Ansatzes der Bauzeit beeinflusst.

### 6.4.2 Ergebnisse Lebenszykluskostenrechnung

Als zweite Analyseverfahren für die Referenzbrücken B und C findet die Lebenszykluskostenrechnung Anwendung. Dabei werden im Vergleich zu den A-Brücken angepasste Kostenansätze verwendet, da unterschiedliche Bauverfahren zum Einsatz kommen, die Bauzeit erheblich länger ist und deutlich höhere Massen verbaut werden.

Auch die bauwerksbezogenen Herstellungs- und Lebenszykluskosten beziehen sich auf beide Überbauten, um einheitliche Systemgrenzen und damit eine Ergebnisvergleichbarkeit sicherzustellen. In den folgenden Untersuchungen wird einheitlich ein realer Diskontierungszinssatz von 2 % verwendet, eine Variation findet nicht statt.

#### 6.4.2.1 Herstellungskosten und Konstruktionsvergleiche

Die Herstellungskosten und Lebenszykluskosten für die beiden Konstruktionsvarianten der Referenzbrücke B sind in Abbildung 6.38 dargestellt. Der Überbau ist bei der Brücke B für knapp 58 % der Herstellungskosten verantwortlich, bei der Variante B-I erhöhen sich die Herstellungskosten um 3 %, da mit den verbauten Fingerübergängen und Kalottenlagern deutlich dauerhaftere und gleichzeitig teurere Komponenten zum Einsatz kommen. Die höheren Investitionskosten führen in der Nutzungsphase allerdings zu einer Reduzierung der Lebenszykluskosten von 1,5 %, da bei den Fingerübergängen nur die Abdichtung regelmäßig erneuert werden muss und die Kalottenlager nur regelmäßige Wartungsarbeiten erfordern, ein Austausch ist innerhalb des Lebenszyklus von 100 Jahren nach der angesetzten Instandhaltungsstrategie nicht erforderlich.

Die Herstellungskosten für die Brücke C ergeben ein vergleichbares Bild, allerdings hat der Unterbau einen deutlich höheren Anteil an den Herstellungskosten, da die Pfeiler durch die Talsituation erheblich länger sind. Wie in Abbildung 6.39 ersichtlich, führt die

Konstruktionsvariante der Ausbildung des Stahltrags in WT-Stahl zu einer Erhöhung der Herstellungskosten des Überbaus. Da innerhalb der Nutzungsphase keine Erneuerung des Korrosionsschutzsystems erforderlich ist, kommt es zur Reduzierung der Lebenszykluskosten um insgesamt 4,4 %.

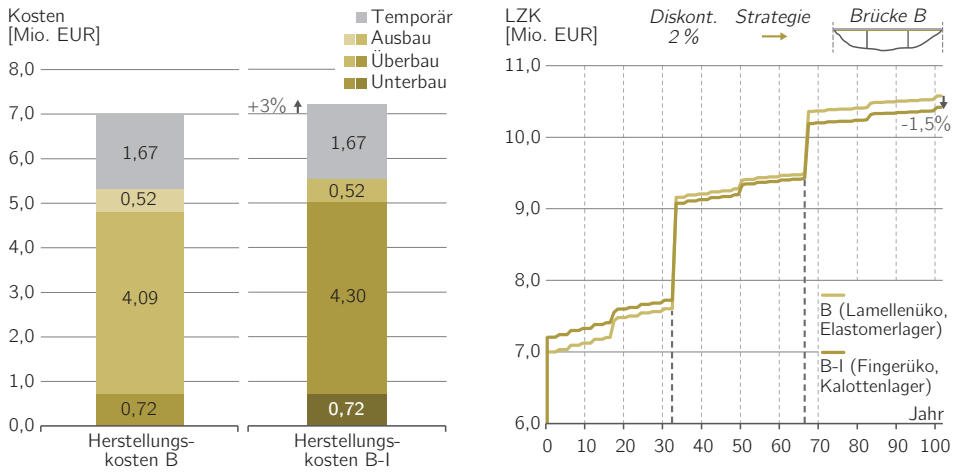


Abbildung 6.38: Herstellungskosten mit Unterteilung in Bauteilgruppen (links) und Lebenszykluskosten (rechts) der Konstruktionsvarianten B und B-I

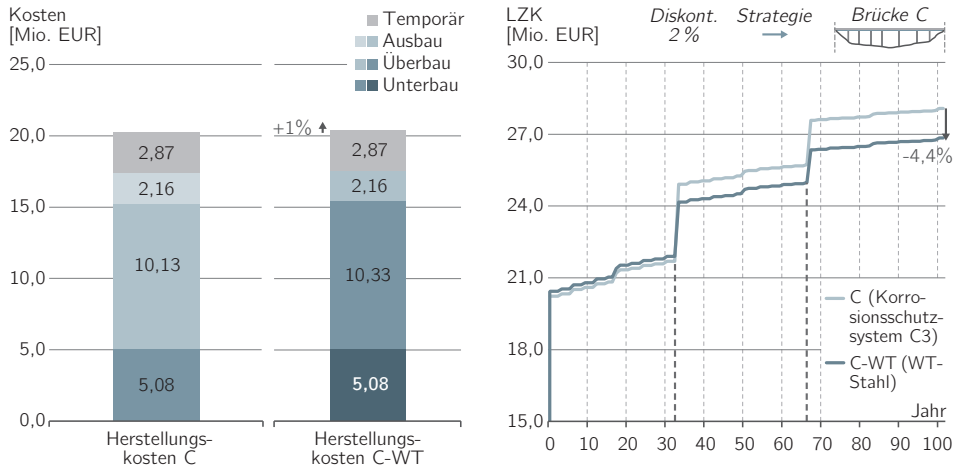


Abbildung 6.39: Herstellungskosten mit Unterteilung in Bauteilgruppen (links) und Lebenszykluskosten (rechts) der Konstruktionsvarianten C und C-WT

### 6.4.2.2 Instandhaltungsstrategien

Abschließend wird die Auswirkung der drei definierten Instandhaltungsstrategien auf die Höhe der Lebenszykluskosten untersucht, die Ergebnisse sind in Abbildung 6.40 dargestellt. Für beide Brücken ergibt sich die zustandsbestimmte Instandhaltungsstrategie als die vorteilhafteste. Die Strategie der gezielten Alterung führt in beiden Fällen zu ca. 2 % höheren Lebenszykluskosten. Bei der Präventivstrategie ergeben sich für die Brücken B und C allerdings unterschiedliche Ergebnisse. Bei der kürzeren Brücke B führt die Präventivstrategie zu 4,1 % höheren Lebenszykluskosten, bei der Brücke C sind es lediglich 1,9 %. Der Unterschied entsteht einerseits durch die unterschiedlichen Spannweiten und Längen der Brücken und kommt andererseits durch die Kostenverteilung zwischen Unter- und Überbau zu Stande.

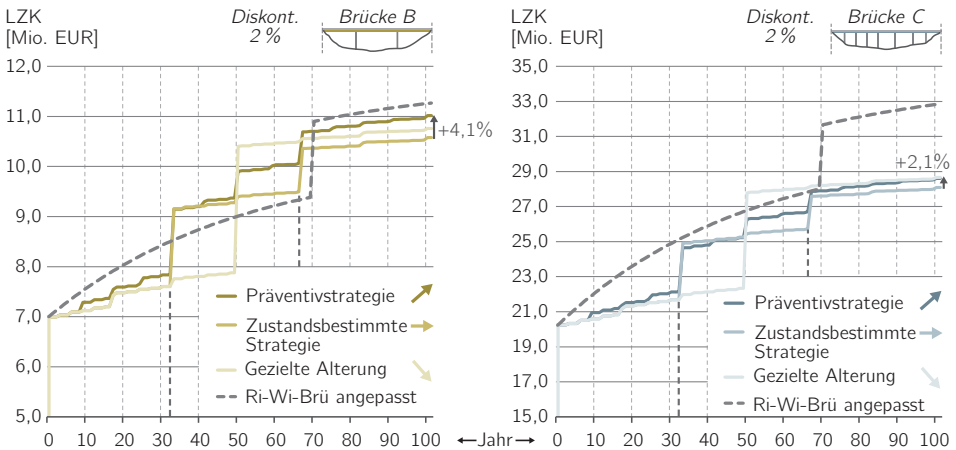


Abbildung 6.40: Lebenszykluskosten der Referenzbrücke B (links) und C (rechts) mit Vergleich der Instandhaltungsstrategien und Gegenüberstellung mit den Ri-Wi-Brü-Ergebnissen

Des Weiteren sind in Abbildung 6.40 die berechneten Lebenszykluskosten den Ergebnissen bei Anwendung der Ri-Wi-Brü gegenübergestellt, wobei die Verwaltungskosten wiederum aus den Ri-Wi-Brü-Ergebnissen herausgerechnet sind (Ri-Wi-Brü angepasst). Die tatsächlichen Lebenszykluskosten der Brücke B werden bei Anwendung des überschlägigen Verfahrens überschätzt, bei der Brücke C findet eine deutliche Überschätzung statt. Da bei der Ri-Wi-Brü ein pauschaler Bezug auf die Herstellungskosten Anwendung findet, ist diese Abweichung nicht überraschend und zeigt genauso wie bei den A-Brücken, dass die Richtlinie nur bedingt im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen anwendbar ist.

## 6.5 Zusammenfassung

Die Durchführung von Lebenszyklusanalysen auf Grundlage von Berechnungsmodellen und unter Verwendung von bauteilbezogenen Eingangsdaten erlaubt die detaillierte Gegenüberstellung von Untersuchungsvarianten und die Integration von Unsicherheiten. Als Untersuchungsvarianten werden für fünf Brücken-Ausführungsvarianten, drei Instandhaltungsstrategien und vier Autobahnsituationen die Auswirkungen mit den Methoden der externen Kostenrechnung, Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung quantifiziert. Die umfassenden Analysen erzeugen eine auf Deutschland regionalisierte Basis, die zur Generierung von Vergleichswerten sowie für die Gestaltung von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen verwendet werden kann.

Alle untersuchten Szenarien bauen – wie bei Nachhaltigkeitsanalysen üblich – auf dem heutigen Kenntnisstand auf. Zukünftige technische Innovationen können nicht bzw. nur sehr bedingt vorhergesagt werden und finden daher keinen Eingang in die Untersuchungen. Für die Verkehrsentwicklung liegen zwar Zukunftsprognosen vor, diese sind allerdings nicht direkt anwendbar. Die Ursache liegt darin begründet, dass Verkehrsprognosen einen Zeitraum von 15 Jahren bzw. maximal 20 Jahren abdecken, maßgebende externe Effekte in der Nutzungsphase aber erst nach 33 Jahren entstehen. Daher müssten bestehende Prognosen zusätzlich extrapoliert werden, was zu großen zusätzlichen Unsicherheiten führte. Deshalb wird einheitlich von den heutigen Verkehrsstärken und -zusammensetzungen in den Berechnungen ausgegangen.

Die in diesem Kapitel berechneten und vorgestellten Ergebnisse sind durchgängig in nicht aggregierter Form dargestellt, d. h. externe Kosten werden nicht mit Lebenszykluskosten verrechnet und externe Umwelteffekte werden nicht mit bauwerksbezogenen ökobilanziellen Ergebnissen zusammengeführt. Der Grund hierfür liegt in den verschiedenen Möglichkeiten der Integration von externen Effekten in eine Bewertung. Externe Effekte können nur in Form von externen Kosten bzw. zusätzlich durch Integration von externen Umwelteffekten in die Ökobilanzierung berücksichtigt werden. Diese verschiedenen Möglichkeiten werden im folgenden Kapitel diskutiert und die Auswirkungen auf das Bewertungsergebnis aufgezeigt.



## 7 Konzeptionelle Integration

Die in den vorherigen Kapiteln vorgestellten Ergebnisse sind unabhängig voneinander dargestellt worden, d. h. externe Effekte und bauwerksbezogene Auswirkungen sowie die Auswirkungen in den einzelnen Nachhaltigkeitsdimensionen sind nicht zusammengeführt worden. Im Rahmen einer Entscheidungsfindung ist allerdings die Integration der Einzelkomponenten erforderlich. Dies kann durch Gegenüberstellung von Ergebnissen mit demselben funktionalen Äquivalent oder durch die Normierung und Wichtung von Indikatoren mit unterschiedlichen Einheiten erfolgen, siehe Abschnitt 2.2.2.

Im Folgenden werden zunächst externe Effekte und bauwerksbezogene Ergebnisse der untersuchten A-Referenzbrücken miteinander verglichen. Der Vergleich findet einmal auf Kostenebene und zum anderen auf der Ebene der Ökobilanzierung statt, um verschiedene methodische Herangehensweisen zu verdeutlichen. Die B- und C-Brücken werden aufgrund der unterschiedlichen Bauaufgabe nicht dargestellt. Im Anschluss wird diskutiert, wie die Ergebnisse der modellgestützten Berechnungen mit weiteren Indikatoren kombiniert werden können. Hierzu wird zunächst in die multikriterielle Entscheidungsunterstützung eingeführt und im Anschluss ein geeignetes Verfahren zum relativen Vergleich von Infrastrukturkomponenten ausgewählt und konzeptionell angewendet.

### 7.1 Integration externer und bauwerksbezogener Ergebnisse

#### 7.1.1 Externe Kosten und Lebenszykluskosten

Die Ergebnisse sowohl der externen Kostenrechnung als auch der Lebenszykluskostenrechnung werden in der Einheit Euro ausgegeben. Hierdurch ist ein direkter Vergleich möglich. Eine Addition der jeweiligen Kosten wird nicht vorgenommen, da externe Kosten und Lebenszykluskosten mit sehr unterschiedlichen Methoden berechnet werden und bei unterschiedlichen Wirtschaftseinheiten der Volkswirtschaft entstehen. Darüber hinaus sind die Unsicherheiten bei den externen Kosten deutlich höher als bei den Lebenszykluskosten, so dass bei einer Addition die Aussagekraft des Ergebnisses gesenkt werden würde.

Eine Gegenüberstellung von Lebenszykluskosten und externen Kosten kann beispielsweise in Matrixform erfolgen. Wie in Abbildung 7.1 maßstabsgetreu dargestellt, können so verschiedene Brückentypen und Instandhaltungsstrategien miteinander verglichen werden. Dabei zeigt sich, dass die externen Kosten für die zustandsbestimmte Instandhaltungsstrategie je nach Brückentyp um den Faktor 3 bis 6 höher sind als die Lebenszykluskosten. Dieser Faktor ändert sich in Abhängigkeit des untersuchten Autobahntyps allerdings deutlich, da die Lebenszykluskosten der Brückentypen unverändert bleiben und externe Kosten beispielsweise bei einer Pendlerautobahn stark steigen. Beim Vergleich von Instandhaltungsstrategien müssen sich beide Kostenarten nicht in die dieselbe Richtung verändern, vor allem bei der der Strategie der gezielten Alterung wird bei den Lebenszykluskosten im Vergleich zur zustandsbestimmten Instandhaltungsstrategie eine Kostenreduzierung erreicht, während die externen Kosten steigen.



Abbildung 7.1: Vergleich von Lebenszykluskosten (LZK, jeweils links) und externen Kosten (ext. K., jeweils rechts) für drei Brückentypen und drei Instandhaltungsstrategien, alle Kostenangaben in Millionen Euro



Für die Stahlbetonbrücke A2-B ist nur eine Strategie für die externen Kosten untersucht worden, daher bleiben zwei Ergebniskästen leer. Die vorgeschlagene Matrix kann um eine dritte Dimension erweitert werden, in der die Ergebnisse von unterschiedlichen Autobahntypen mit aufgenommen werden.

### 7.1.2 Externe Umwelteffekte und ökobilanzielle Ergebnisse

In den im letzten Abschnitt dargestellten Ergebnissen sind monetarisierte externe Umwelteffekte enthalten. Diese tragen zu der Höhe der externen Gesamtkosten nur zu einem sehr kleinen Teil bei. Externe Umwelteffekte können allerdings auch den bauwerksbezogenen Ökobilanzierungsergebnissen gegenübergestellt werden, siehe Abbildung 7.2.

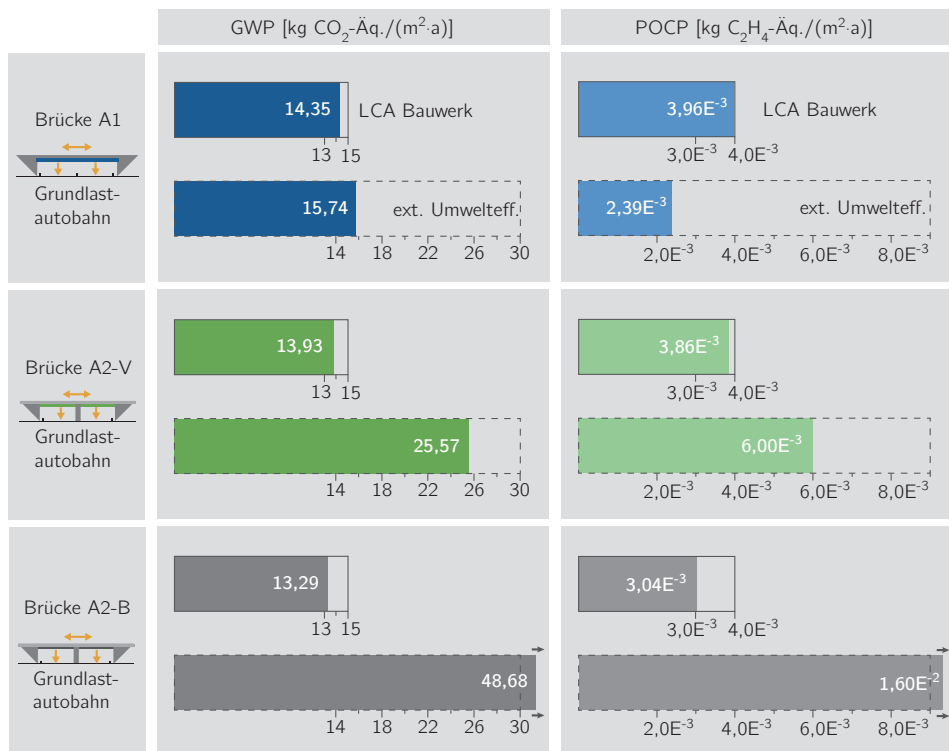


Abbildung 7.2: Vergleich von bauwerksbezogenen Ökobilanzierungsergebnissen (LCA, jeweils oben) und externen Umwelteffekten (jeweils unten) für drei Brückentypen und die zwei Wirkungskategorien Treibhauspotential (GWP, links) sowie Ozonbildungspotential (POCP, rechts)

Hier zeigt sich, dass für die Integralbrücke A1 die potentiellen Umweltwirkungen des Bauwerks und die externen Umwelteffekte in derselben Größenordnung liegen, für das Stahlverbundbauwerk A2-V ergibt sich ein um 50 bis 80 % höheres Niveau der externen Umwelteffekte. Für das Stahlbetonbauwerk liegt zwischen bauwerksbezogenen und externen Ökobilanzierungsergebnissen ein Faktor von 3 bis 8, je nach untersuchter Wirkungskategorie.

Die beschriebenen Zusammenhänge stellen sich auch in den übrigen Wirkungskategorien ein. Vor allem in Bezug auf die externen Umwelteffekte zeigt sich, dass diese bei einer Integration in die Ökobilanz einen erheblichen Beitrag zum Ergebnis leisten. Hieraus zu ziehende Schlussfolgerungen werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

### 7.1.3 Diskussion

Externe Umwelteffekte sind in den vorhergehenden Untersuchungen einmal in die externen Kosten eingerechnet und zum anderen in Form von potentiellen Umweltwirkungen im Rahmen der Durchführung einer Ökobilanzierung dargestellt worden. Als Eingangswerte sind jeweils dieselben Emissionsmengen und Schadstoffkategorien verwendet worden. Diese beiden Möglichkeiten der Berücksichtigung externer Umwelteffekte führen allerdings zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Die Ursachen hierfür können ohne detaillierte Gegenüberstellung der Untersuchungsmethoden nicht endgültig identifiziert werden, die im Folgenden vorgestellten Gründe liefern erste Ansatzpunkte für weitere Analysen.

Eine Ursache kann in den methodisch unterschiedlichen Berechnungsverfahren der beiden Methoden der externen Kostenrechnung und Ökobilanzierung liegen. Die Abläufe sowie Unterschiede werden in Abschnitt 3.2.3 vorgestellt. Externe Kosten sind dabei voll aggregiert, während Ökobilanzierungsergebnisse i. d. R. in Wirkungskategorien (also als Midpoint-Indikatoren) ausgewiesen werden. Da somit die Ergebnisse auf unterschiedlichen Ebenen vorliegen, müssen für eine vollständige Vergleichbarkeit die einzelnen Wirkungskategorien der Ökobilanz zusammengeführt werden. Dafür können beispielsweise die im Nachhaltigkeitsbewertungssystem des Bundes angegebenen Bedeutungsfaktoren Anwendung finden, die eine Wichtung der Wirkungskategorien ermöglichen.

Allerdings zeigt sich, dass – bis auf Ausnahme einer Wirkungskategorie bei der Integralbrücke – die externen Umwelteffekte in der Ökobilanz mindestens so groß sind wie die bauwerksbezogenen Auswirkungen. Eine Zusammenführung der bauwerksbezogenen

Ökobilanzergebnisse in einem Endpoint-Indikator würde somit nicht zu einer Veränderung der Aussage führen, dass externe Umwelteffekte mindestens in der Größenordnung der bauwerksbezogenen Umweltwirkungen liegen. Daher wird auf die Wichtung der Ökobilanzergebnisse verzichtet.

Große Unsicherheiten bei der Berechnung von externen Kosten werden durch die zu verwendenden Monetarisierungsansätze erzeugt. Da Monetarisierungen hauptsächlich in volkswirtschaftlich orientierten Studien angewendet werden, könnte darauf geschlossen werden, dass die Monetarisierungsansätze von Luftschadstoffen gegenüber den Ansätzen für Zeit- und Betriebskosten ein Ungleichgewicht aufweisen. Das Ungleichgewicht kann bei dieser Argumentation allerdings auch in dem (stillschweigend angenommenen) Ansatz liegen, dass die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeitsdimension eine gleich große Bedeutung für das Gesamtergebnis haben. Diese im Bauwesen übliche Sichtweise ist politisch begründet. Wenn das Verhältnis von externen Umweltkosten und externen Gesamtkosten auf eine Gewichtung zwischen Lebenszykluskosten und Ökobilanzergebnissen für den Anwendungsfall Brücken übertragen werden würde, hieße dies, dass die bauwerksbezogenen Ökobilanzierungsergebnisse im Vergleich zu den bauwerksbezogenen Lebenszykluskosten in einer Gesamtbewertung einen deutlich geringeren Einfluss ausüben sollten, als sie es derzeit tun.

Die Ausführungen zeigen, dass es für die unterschiedlich hohe Bedeutung externer Umwelteffekte in verschiedenen Nachhaltigkeitsdimensionen methodische, politische und bewertungssystemabhängige Gründe geben kann. Da keine bauwesenorientierten Studien existieren, die externe Verkehrseffekte sowohl in externe Kosten umrechnen als auch in eine Ökobilanzierung integrieren, kann keine Gegenüberstellung mit anderen Untersuchungsansätzen erfolgen. Da die Art der Integration von externen Effekten in einem Bewertungssystem große Auswirkungen auf das Ergebnis haben kann, werden im Folgenden unterschiedliche Systemgestaltungen untersucht.

## **7.2 Multikriterielle Entscheidungsunterstützung**

### **7.2.1 Grundlagen der Entscheidungstheorie**

Entscheidungen müssen täglich von Individuen oder Gruppen getroffen werden, wobei eine Entscheidung als die Auswahl einer von mehreren Handlungsalternativen beschrieben werden kann. Deshalb ist die Formulierung und Lösung von Entscheidungsproblemen

in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen ein wichtiges Thema (LAUX 2007). Vor allem wenn mehrere Alternativen existieren und diese unter Einbeziehung unterschiedlicher Kriterien bewertet werden müssen, kann oftmals keine Alternative eindeutig als vorteilhaft identifiziert werden. Dann sind Vor- und Nachteile einer Alternative abhängig von den Beiträgen der jeweiligen Zielkriterien zum Gesamtziel individuell abzuwägen (SPENGLER et al. 1997).

Wenn die Anzahl der Kriterien oder Alternativen sehr groß ist, verwenden Menschen heuristische Prinzipien, um die Komplexität einer Entscheidung zu reduzieren. Dadurch entstehen Verzerrungen, die zu einer Falscheinschätzung des tatsächlichen Ergebnisses führen (TVERSKY und KAHNEMAN 1974). Zur Entscheidungsunterstützung können multiattributive Entscheidungsmodelle (Multi Attribute Decision Making, MADM) angewendet werden, die je nach Modellgestaltung einfache bis komplexe mathematische Algorithmen verwenden, um eine Rangordnung der Alternativen zu erzeugen (GELDERMANN 2006). Dabei gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden. Ein Gliederungsvorschlag wird von HWANG und YOON (1981) vorgenommen und von GÖTZE (2008) um nach 1981 entstandene Verfahren erweitert. Im Weiteren findet eine Konzentration auf Methoden statt, die Eingangsinformationen verwenden, die auf einer Kardinalskala vorliegen oder in eine kardinale Darstellung überführt werden können. Dieses Vorgehen stimmt mit der in Abschnitt 2.2.3 getroffenen Festlegung überein, dass in dieser Arbeit vornehmlich Indikatoren verwendet werden, die auf Modellen aufbauen und damit Ergebnisse darstellbar auf einer Kardinalskala erzeugen.

Eine vergleichsweise einfache Methode ist die in den 1970er Jahren entwickelte *Nutzwertanalyse*. Hierbei werden verschiedene Alternativen in eine Ordnung gebracht, die die Präferenzen eines Entscheiders abbildet (ZANGEMEISTER 1971). Der Nutzwert verschiedener Alternativen wird berechnet, indem die Merkmalsausprägungen aller einzubeziehenden Kriterien bestimmt und die Kriterien dann untereinander gewichtet werden. Dieses Vorgehen entspricht im Wesentlichen den in den deutschen Nachhaltigkeitsbewertungssystemen verwendeten Ansätzen. Eine Herausforderung stellt dabei die Festlegung der Wichtungsfaktoren dar. Diese können beispielsweise mit dem von SAATY (1980) entwickelten Verfahren des *analytischen Hierarchie Prozesses* (AHP) bestimmt werden. Dazu werden jeweils zwei Kriterien auf derselben Hierarchieebene miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Bedeutung zueinander bewertet. Die durchgeführten Paarvergleiche werden dann ausgewertet und unter Anwendung der Eigenvektormethode können Wichtungsfaktoren berechnet werden. Der Vorteil des analytischen Hierarchie Prozesses liegt darin, dass die Paarvergleiche die Komplexität eines Systems reduzieren und der Bewertungsgegenstand vom Menschen kognitiv erfasst werden kann (SAATY 1980).

Paarweise Vergleiche werden auch bei Anwendung der *Preference Ranking Organisation Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE) durchgeführt. Hierbei wird die Differenz der Ergebnisse zweier Alternativen gebildet und das Ergebnis dann mit einer vorher definierten Präferenzfunktion bewertet (BRANS und VINCKE 1985). Auf diese Weise kann eine Gegenüberstellung von Ergebnissen erfolgen, wobei die zum Einsatz kommenden Wichtungsfaktoren der Kriterien untereinander entweder bekannt sein oder die Auswirkungen unterschiedlicher Wichtungsfaktoren miteinander verglichen werden können müssen (GELDERMANN 2006). Da diese Methode die Bewertung der relativen Vorteilhaftigkeit verschiedener Ausführungsalternativen von Brücken erlaubt, wird sie im Folgenden angewendet. Eine mathematische Formulierung des Berechnungsablaufes wird im Rahmen der Anwendungsrechnungen präsentiert.

### 7.2.2 Anwendung im Bauwesen

Die drei im vorherigen Abschnitt vorgestellten Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung besitzen eine große Relevanz für Fragestellungen, die im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen zu beantworten sind. Nachhaltigkeitsbewertungssysteme sind i. d. R. als Kriterienbaum aufgebaut, siehe Abschnitt 2.2.2. Die Zusammenführung der einzelnen Kriterien erfolgt dabei analog zum Vorgehen der Nutzwertanalyse. Für die bestehenden Nachhaltigkeitsbewertungssysteme des Hochbaus sind die in Deutschland zur Anwendung kommenden Wichtungsfaktoren dabei größtenteils von den Teilnehmern des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen festgelegt worden.

Vorschläge für die Gestaltung eines Nachhaltigkeitsbewertungssystems für Brücken und die Darstellung in einem Kriterienbaum macht FOGIB (1997). Für die Zusammenführung wird hier ein modifizierter analytischer Hierarchie Prozess verwendet. Die in die Bewertung zu integrierenden Kriterien bzw. Indikatoren sind dabei nicht fest definiert, sondern es wird eine projektspezifische Auswahl empfohlen. Andere infrastrukturbezogene Studien verwenden die Methode AHP, um die Bedeutung von Einzelkriterien für ein Gesamtsystem zu ermitteln (KOO et al. (2009); SÁNCHEZ und LÓPEZ (2010)). Auf Basis von Umfragen und Expertenmeinungen können so Wichtungsfaktoren abgeleitet werden.

In Anhang G sind Kriterien und Indikatoren zusammengestellt, die in verschiedenen Studien untersucht und hauptsächlich mit der Methode des AHP zusammengeführt werden. Die Indikatorenliste wird nach der in Deutschland verbreiteten Gliederungssystematik strukturiert (siehe Abbildung 2.7). Die Indikatoren sind dabei auf eine Anwendung für Infrastrukturen ausgelegt und es wird jeweils ausgewiesen, ob der jeweilige Indikator auch in

einem Bewertungssystem für Brücken sinnvoll eingesetzt werden kann. Wenn Wichtungsfaktoren definiert werden, können die aufgeführten Indikatoren mit den in dieser Arbeit erzeugten Berechnungsergebnissen in einem Bewertungssystem zusammengeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass in den Indikatoren erfasste Betrachtungsgegenstände auch Auswirkungen auf die in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsmethoden der Ökobilanzierung, Lebenszykluskostenrechnung und externen Kostenrechnung haben können, siehe entsprechende Bewertung in Anhang G. Dieselben Sachverhalte können damit auf verschiedene Arten in einem Bewertungssystem abgebildet werden. Es ist darauf zu achten, dass nicht gewollte Doppelzählungen vermieden und gewünschte Mehrfachwirkungen richtig abgebildet werden (LÜTZKENDORF und LORENZ 2004).

### 7.2.3 Indikatorzusammenführung mit PROMETHEE

Die Zusammenführung von Indikatoren in einem Bewertungssystem erfordert neben der Definition von Wichtungsfaktoren auch die Normierung der Indikatorenergebnisse, wenn diese auf verschiedenen Skalen vorliegen. Es ist allerdings auch möglich, die Ergebnisunterschiede jedes Indikators miteinander zu vergleichen und dann mit einer Präferenzfunktion zu bewerten, wie es bei dem Verfahren PROMETHEE geschieht. Hierdurch muss im Vorhinein nicht festgelegt werden, ob beispielsweise absolute externe Kosten i. H. v. 4 Mio. Euro ein gutes oder schlechtes Berechnungsergebnis darstellen. Es wird vielmehr analysiert, ob die *Ergebnisdifferenz* zweier Ausführungsvarianten von beispielsweise 0,1 Mio. Euro dazu führt, eine Variante vollständig zu bevorzugen (vollständige Präferenz), eine Variante zu einem gewissen Grad zu bevorzugen (schwache Präferenz) oder aufgrund des vergleichsweise kleinen absoluten Unterschieds beide Varianten als gleichwertig zu betrachten (Indifferenz). Vor allem vor dem Hintergrund der Abhängigkeit externer Kosten vom zu Grunde liegenden Autobahntyp stellt dieser vergleichende Bewertungsansatz eine geeignete Methode dar, um den stark standortabhängigen Berechnungsergebnissen von Brücken gerecht zu werden.

BRANS und VINCKE (1985) schlagen als Präferenzfunktionen insgesamt sechs Möglichkeiten vor. Mit Hilfe einer Präferenzfunktion  $p(d)$  wird die Differenz zwischen jeweils zwei Alternativen  $f(a_i) - f(a_j) = d$  für jedes Kriterium in dem Intervall  $[0,1]$  abgebildet. Dabei steht der Wert 0 für Indifferenz, ein Wert größer 0 und kleiner 1 für eine schwache Präferenz und 1 für eine vollständige Präferenz. Eine grafische Darstellung aller sechs Präferenzfunktionen findet sich in Abbildung 7.3. In den Berechnungen wird ausschließlich der Typ 5 verwendet, da hiermit ein Indifferenzbereich definiert und Ergebnisunterschiede

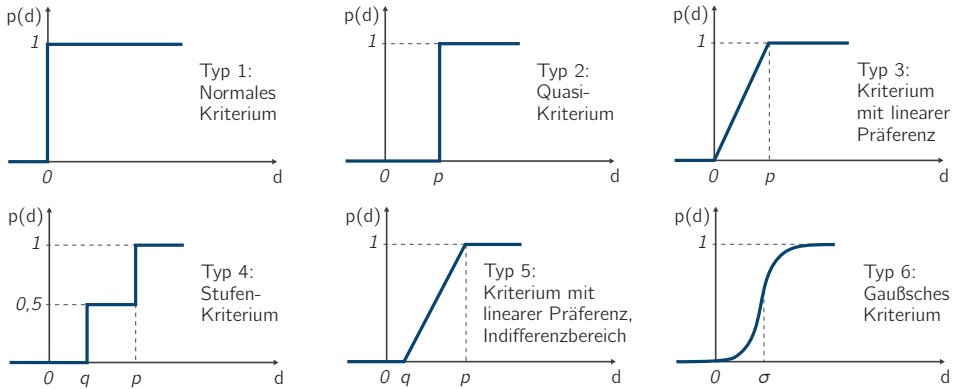


Abbildung 7.3: Anwendbare Präferenzkurven zur Bewertung der Differenzen von Alternativen in der Methode PROMETHEE (Brans und Vincke 1985)

stufenlos bewertet werden können. Der Berechnungsablauf der PROMETHEE-Methode wird im Folgenden aufbauend auf GELDERMANN (2006) skizziert:

1. Definition der zu untersuchenden Alternativen  $a$  und der in die Analysen zu integrierenden Kriterien  $k$ .
2. Bestimmung der Wichtungsfaktoren  $w_k$  für jedes Kriterium  $k$ , wobei:

$$\sum_{k=1}^K w_k = 1 \quad (7.1)$$

3. Festlegung der zu verwendenden Präferenzkurve (Typ 1 bis 6) und der zur Kurvenbeschreibung notwendigen Parameter für jedes Kriterium.
4. Berechnung der Präferenzwerte  $p_k$  für alle Kriterien, Berechnung der Outranking-Relation  $\pi$  als Summe der gewichteten Präferenzwerte jeder Alternative  $a_i$  verglichen mit der Alternative  $a_j$ :

$$\pi(a_i, a_j) = \sum_{k=1}^K w_k \cdot p_k(f(a_i) - f(a_j)) \quad (7.2)$$

5. Berechnung der Ausgangs- und Eingangsflüsse. Ein großer Ausgangsfluss  $\phi^+(a_i)$  gibt an, dass die Alternative  $a_i$  andere Alternativen stark dominiert:

$$\phi^+(a_i) = \frac{1}{J-1} \sum_{j=1}^J \pi(a_i, a_j) \quad (7.3)$$

Ein großer Eingangsfluss  $\phi^-(a_i)$  zeigt, dass eine Alternative  $a_i$  stark von anderen Alternativen dominiert wird. Die Berechnung erfolgt mit:

$$\phi^-(a_i) = \frac{-1}{J-1} \sum_{j=1}^J \pi(a_j, a_i) \quad (7.4)$$

6. Bei einer Ergebnisdeutung nach PROMETHEE I werden die Alternativen nach der Höhe der Ausgangs- und Eingangsflüsse geordnet, wobei sich dabei keine eindeutige Vorteilhaftigkeit zeigen muss. Es steht das Aufzeigen von Zusammenhängen zwischen den einzelnen Alternativen im Vordergrund.
7. Eine Rangfolge der Alternativen kann mit PROMETHEE II erzeugt werden, indem der Gesamtfluss bzw. Nettofluss berechnet wird. Der größte Fluss  $\phi(a_i)$  kennzeichnet die vorteilhafteste Alternative:

$$\phi(a_i) = \phi^+(a_i) + \phi^-(a_i) \quad (7.5)$$

Die beschriebenen Algorithmen werden in die Softwareumgebung Matlab, Release 2012a, implementiert. Dabei sind verschiedene Arten der Integration externer Effekte möglich. In MENSINGER et al. (2012) wird vorgeschlagen, zwei unterschiedliche Systemgestaltungen zu untersuchen, die sich einmal durch die separate Erfassung aller externen Effekte in der sozialen Nachhaltigkeitsdimension und zum anderen durch die Integration der externen Effekte in die ökonomische und ökologische Dimension auszeichnen. Dieser Ansatz wird hier erweitert und es werden drei Systemvarianten untersucht, die sich in einem unterschiedlich hohen Grad der Bedeutung von externen Effekten für das Gesamtergebnis unterscheiden. Eine Visualisierung der hier untersuchten Systemvarianten findet sich in Abbildung 7.4.

In den drei Bewertungssystemvarianten können sowohl alle in dieser Arbeit berechneten Ergebnisse berücksichtigt als auch weitere Indikatoren erfasst werden, die in Anhang G aufgeführt sind. Durch die Aufnahme von zusätzlichen Indikatoren sinkt die prozentuale Bedeutung der übrigen Indikatoren und damit auch der Einfluss der berechneten externen Effekte. Die hier untersuchten Systemvarianten zeigen damit den maximalen Einfluss externer Effekte auf das jeweilige Gesamtergebnis. Bei Berücksichtigung der in Abbildung 7.4 angegebenen Wichtungsfaktoren ist in der Systemvariante 1 der Einfluss externer Effekte auf das Ergebnis am geringsten, bei der Systemvariante 3 am größten.

Alle Eingangswerte für die Methodenanwendung von PROMETHEE sind in Tabelle 7.1 am Beispiel der Systemvariante 2 zusammengestellt. Die Indikatorenwerte für die drei



zu vergleichenden Brückentypen stammen vollständig aus den Anwendungsberechnungen in Kapitel 6. Die Wichtungsfaktoren leiten sich aus einer Gleichgewichtung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen sowie einer Gleichgewichtung von externen und bauwerksbezogenen Auswirkungen ab (siehe Abbildung 7.4, Mitte). Zur Zusammenführung der Wirkungskategorien der Ökobilanz wird auf die Wichtungsangaben des „Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen“ des Bundes mit dem Stand 2011 zurückgegriffen, in dem das Treibhauspotential (GWP) und der Gesamtprimärenergiebedarf ( $PE_{ges}$ ) gegenüber den restlichen Wirkungskategorien mit einem Faktor 3 in die Gesamtbewertung einfließen.

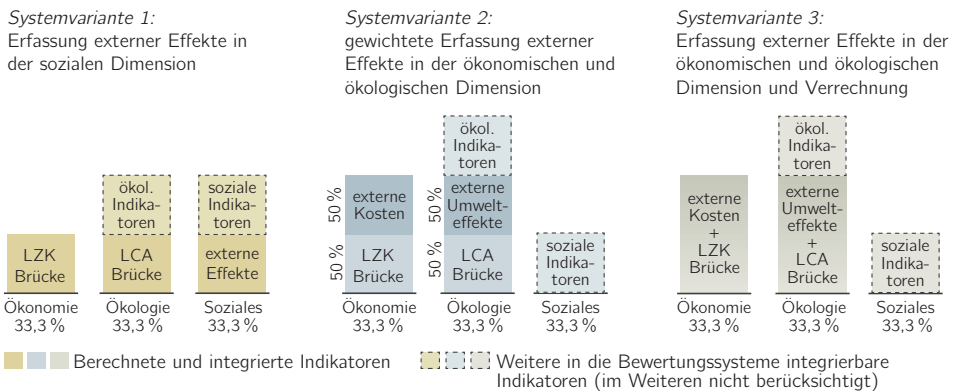


Abbildung 7.4: Untersuchte Systemvarianten von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen für Infrastrukturen, die sich in der unterschiedlichen Einbindung von externen Effekten unterscheiden

Da in der Systemvariante 2 keine sozialen Indikatoren Anwendung finden, nehmen alle Brücken denselben Indikatorwert null an. Hier zeigt sich ein großer Vorteil der Berechnungsmethode PROMETHEE. Da die Differenz zwischen allen Varianten  $a_i$  und  $a_j$  null ist, ergibt die Abbildung dieser Werte auf der Präferenzfunktion eine Indifferenz zwischen den Brückenvarianten. Diese Indifferenz fließt in die Gesamtbewertung ein und ermöglicht die Beibehaltung der Gleichgewichtung der drei Nachhaltigkeitsdimensionen. Durch diesen Berechnungsansatz wird gewährleistet, dass die Systemvarianten 1 und 2 gleiche Systemgrenzen aufweisen und damit vergleichbar sind.

Zur Herleitung der Parameter  $p$  und  $q$ , die die Präferenzkurve des Typs 5 beschreiben, wird ein prozentualer Ansatz mit einem Bezug auf die Integralbrücke A1 verwendet. Der Indifferenzwert  $q$  entspricht dabei jeweils 1 % des jeweiligen Ergebnisses der Brücke A1, siehe Tabelle 7.1. Für die Lebenszykluskosten heißt dies, dass eine Ergebnisdifferenz zweier Varianten, die unterhalb von 15.500 Euro liegt, zu keiner Bevorzugung einer Variante führt. Der Indifferenzwert  $q$  kann damit als Unerheblichkeitswert beschrieben werden.

Tabelle 7.1: Verwendete Eingangswerte für die Systemvariante 2 zur Anwendung von PROMETHEE

Indikator/ Kriterium	Indikatorenwert			Wichtungs- faktor	q		p	
	A1	A2-V	A2-B		1% A1	% A1	Wert	
Lebenszykluskosten	1,55	1,58	1,45	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} = 0,167$	0,016	20%	0,310	
externe Kosten	4,49	5,94	8,86	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} = 0,167$	0,045	80%	3,592	
GWP Bauwerk	14,35	13,93	13,29	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{10} = 0,050$	0,144	30%	4,305	
POCP Bauwerk	3,96E-03	3,86E-03	3,04E-03	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	3,96E-05	30%	1,19E-03	
ODP Bauwerk	9,39E-08	6,91E-08	2,41E-09	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	9,39E-10	30%	2,82E-08	
EP Bauwerk	5,66E-03	5,36E-03	4,96E-03	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	5,66E-05	30%	1,70E-03	
AP Bauwerk	3,56E-02	3,47E-02	3,29E-02	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	3,56E-04	30%	1,07E-02	
PE <sub>ges</sub> Bauwerk	1,64E+02	1,57E+02	1,46E+02	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{10} = 0,050$	1,640	30%	49,200	
GWP extern	15,74	25,57	48,68	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{10} = 0,050$	0,157	80%	12,592	
POCP extern	2,39E-03	6,00E-03	1,60E-02	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	2,39E-05	80%	1,91E-03	
ODP extern	2,79E-06	4,56E-06	8,09E-06	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	2,79E-08	80%	2,23E-06	
EP extern	9,81E-03	1,85E-02	3,88E-02	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	9,81E-05	80%	7,85E-03	
AP extern	3,69E-02	7,02E-02	1,48E-01	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{10} = 0,017$	3,69E-04	80%	2,95E-02	
PE <sub>ges</sub> , extern	2,36E+02	3,85E+02	6,83E+02	$\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{10} = 0,050$	2,360	80%	188,80	
soziale Indikatoren	0	0	0	$\frac{1}{3} = 0,333$	0	0	0	

Der Wert p variiert in Abhängigkeit des untersuchten Indikators. Wie in Tabelle 7.1 angegeben, wird für die Lebenszykluskosten ein Wert i. H. v. 20 %, für alle bauwerksbezogenen Ökobilanzergebnisse ein Wert i. H. v. 30 % und für alle externen Effekte ein Wert i. H. v. 80 % verwendet, jeweils bezogen auf die absoluten Ergebnisse von Brücke A1. Die unterschiedlichen prozentualen Ansätze werden aufgrund der unterschiedlich großen Ergebnisbandbreiten sowie Ergebnisunsicherheiten gewählt. Darüber hinaus ermöglicht dieser Ansatz, dass eine Ausrichtung der Präferenzkurven an den standortspezifischen Randbedingungen erfolgt. Treten beispielsweise bei der Pendlerautobahn sehr hohe externe Effekte auf, wird der Bereich mit schwacher Präferenz vergrößert und eine ausreichend differenzierte Abbildung von Präferenzen gewährleistet.

Die Berechnungsergebnisse bei Anwendung der PROMETHEE-Methode für die drei Systemvarianten zeigt Abbildung 7.5. Es ist erkennbar, dass sich die Ergebnisse zwischen den Brückentypen stark aufspreizen, wenn unterschiedliche Systemvarianten zum Einsatz kommen. Die Systemvariante 1 führt im Gesamtfluss  $\phi$  zu einer Vorteilhaftigkeit der Brücke A1, zeigt aber auch, dass beim Ausgangsfluss  $\phi^+$  die Brücken A1 und A2-B in etwa eine gleich hohe Dominanz gegenüber anderen Brückentypen erzeugen. Dieses Bild ändert sich deutlich für die Systemvariante 3, bei der eine starke Dominanz von Brücke A1 vorliegt und die Brücke A2-B absolut von den anderen Brückentypen dominiert wird, was

daran erkennbar ist, dass der Ausgangsfluss  $\phi^+$  null ist. Bei Systemvariante 3 wird durch die Addition von bauwerksbezogenen Ergebnissen und externen Effekten aufgrund der hohen externen Effekte für den Anwendungsfall der Grundlastautobahn die Bedeutung der Bauwerksergebnisse stark gesenkt. Dadurch haben die Lebenszykluskosten und die Bauwerksökobilanz so gut wie keine Bedeutung mehr für das Bewertungsergebnis.

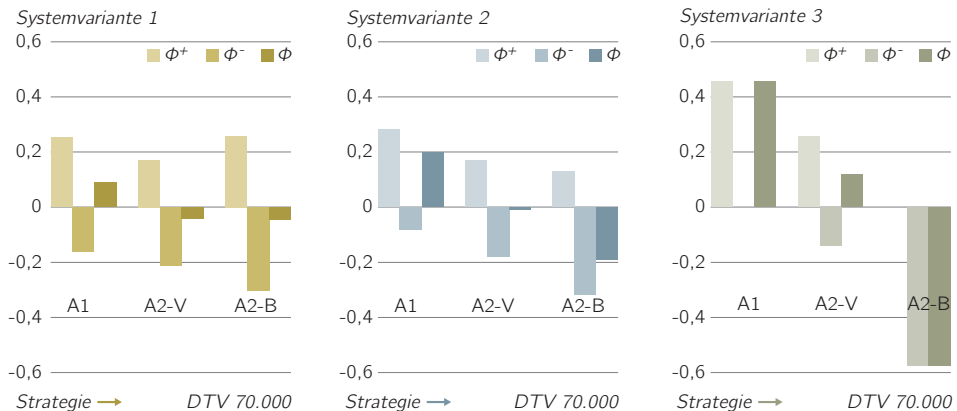


Abbildung 7.5: PROMETHEE-Ergebnisse des Vergleichs der Brücken A1, A2-V und A2-B bei Verwendung unterschiedlicher Systemvarianten

Auf Basis der Gegenüberstellung wird empfohlen, die Systemvariante 2 als Vorbild für die Gestaltung von Infrastruktur-Nachhaltigkeitsbewertungssystemen zu verwenden, bei denen ein starker Einfluss externer Effekte vorliegt. Hierdurch werden Auswirkungen aus verschiedenen Quellen denselben Nachhaltigkeitsdimensionen zugeordnet, so dass Bauwerkskosten und volkswirtschaftliche Kosten in der Dimension Ökonomie sowie alle Umweltwirkungen in der Dimension Ökologie erfasst werden. Durch die Deckelung des Einflusses externer Effekte auf das Gesamtergebnis wird verhindert, dass externe Effekte bauwerksbezogene Ergebnisse beispielsweise für den Anwendungsfall der Grundlastautobahnen fast vollständig dominieren.

#### 7.2.4 Autobahntypenvergleich mit PROMETHEE

Abschließend wird die Auswirkung von verschiedenen Autobahntypen auf das Bewertungsergebnis untersucht. Dabei werden dieselben Bauwerke jeweils an unterschiedlichen Standorten positioniert, wobei die vier in Abschnitt 5.1.3 definierten Autobahntypen zu

Grunde gelegt werden. Verwendet wird dabei die Systemvariante 2. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7.6 zusammengefasst und es ist erkennbar, dass die beiden stark und die beiden schwächer verkehrsbelasteten Autobahntypen ähnliche Ergebnisse erzeugen.

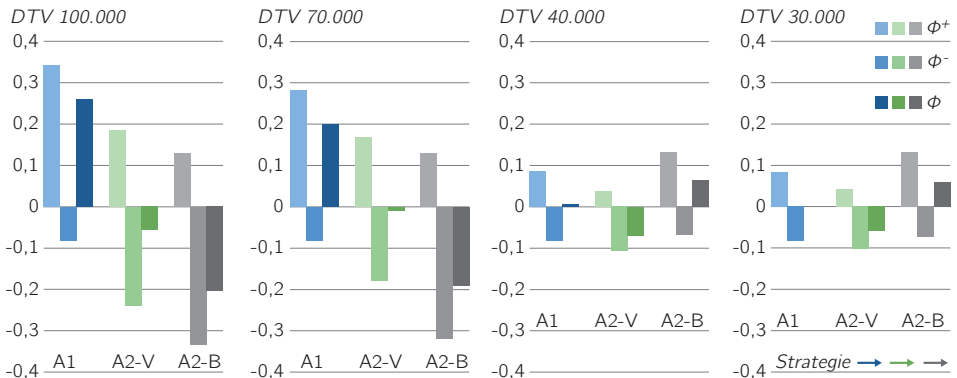


Abbildung 7.6: PROMETHEE-Ergebnisse des Vergleichs der Brücken A1, A2-V und A2-B für vier verschiedene Verkehrssituationen, Verwendung der Systemvariante 2

Die wichtigste Erkenntnis ist allerdings der Tausch der Ergebnisränge, wenn hoch und niedrig belastete Autobahntypen verglichen werden. Bei der Grundlastautobahn ist die Integralbrücke A1 die vorteilhafteste Lösung, während bei der Landautobahn die Stahlbetonbrücke A2-B den größten Gesamtfluss  $\phi$  erzeugt. Die Ursache liegt darin begründet, dass die externen Kosten und externen Umwelteffekte bei der Land- und Wochenendaubahn für alle Brücken deutlich geringere relative Unterschiede aufweisen. Das absolut niedrigere Ergebnisniveau wird durch den auf die Ergebnisse der Brücke A1 bezogenen Wert  $p$  bei der Definition der Präferenzfunktion bereits berücksichtigt. Hierdurch wird das Bewertungssystem auf die standortspezifischen Größenordnungen der Ergebnisse geeicht. Insgesamt treten bei niedrig verkehrsbelasteten Autobahnen somit die bauwerksbezogenen Unterschiede stärker in den Vordergrund. Die Berechnungsmethode reagiert nicht sensitiv auf die prozentuale Veränderung der Präferenzfunktionswerte  $q$  und  $p$ .

Die Integration der Ergebnisse in ein auf die Erfordernisse von Infrastrukturbauwerken abgestimmtes Bewertungssystem zeigt, dass eine Vielzahl an Wechselwirkungen mit der vorgeschlagenen Bewertungssystematik in geeigneter Weise abgebildet werden kann. Ein Nachteil der Bewertung mit der Methode PROMETHEE ist allerdings, dass bei einem Vergleich von zwei schlechten Alternativen die Ergebnisdifferenz eine geringe Aussagekraft besitzt. Um dies zu umgehen, sollten zusätzlich Erfahrungswerte im Rahmen eines Benchmarkings in den Planungsprozess einbezogen werden.

## 8 Fazit

Nachhaltigkeitsanalysen zeichnen sich durch das Zusammenführen verschiedener Aspekte mit dem Ziel, ein Projekt, Bauwerk oder Bauteil ganzheitlich zu analysieren, aus. Dabei kommen i. d. R. Indikatoren zum Einsatz, die einen komplexen Sachverhalt vereinfacht abbilden und somit eine Bewertung ermöglichen. In dieser Arbeit findet eine Konzentration auf die Anwendung von abstrakten Leistungsindikatoren statt, die Sachverhalte mit Hilfe von Modellen beschreiben. Dies hat den großen Vorteil, dass eine Änderung von Eingangsvariablen eine Veränderung der Berechnungsergebnisse zur Folge hat und die Höhe der Ergebnisänderung zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit verwendet werden kann. Auf diese Weise können Variantenvergleiche durchgeführt und Ergebnisunterschiede auf einer Kardinalskala dargestellt werden.

Angewendet werden insbesondere die Methoden der externen Kostenrechnung, Lebenszykluskostenrechnung und Ökobilanzierung. Alle drei Methoden bauen vollständig auf Modellen auf und verwenden aufeinander abgestimmte Systemgrenzen. Unsicherheiten werden mit Hilfe von Szenarioanalysen, Sensitivitätsanalysen und Monte-Carlo-Simulationen berechnet und bewertet. Durch Anwendung von Verfahren zur multikriteriellen Entscheidungsunterstützung können weitere Indikatoren in die Entscheidungsfindung eingebunden werden. Eine Vielzahl solcher Indikatoren ist bereits in diversen Studien vorgeschlagen worden, sie haben meist eine einfache Anwendbarkeit zum Ziel und basieren damit i. d. R. auf Checklisten. Eine Verknüpfung dieser Indikatoren mit den durchgeführten modellgestützten Berechnungen ist nach der Definition eines Bewertungssystems leicht möglich.

Die Gestaltung von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen für Infrastrukturen ist Gegenstand laufender Diskussionen. Da Infrastrukturbauwerke eine Reihe von Unterschieden verglichen mit Hochbauten aufweisen, ist eine gegenüber dem Hochbau veränderte Bewertungssystematik erforderlich. Die detaillierten Analysen in dieser Arbeit zeigen am Beispiel von Brücken, dass vor allem die Wechselwirkungen zwischen dem Bauwerk und den angrenzenden Straßen eine Anpassung erforderlich machen. Im Folgenden werden zunächst Berechnungsergebnisse und im Anschluss methodische Erkenntnisse zusammengefasst. Hierauf aufbauend werden Empfehlungen für eine praktische Umsetzung gegeben und zukünftiger Forschungsbedarf identifiziert.

## 8.1 Erkenntnisse Anwendungsrechnungen

Alle Anwendungsberechnungen werden für drei Typen von Referenzbrücken durchgeführt, wobei bei den A-Brücken eine Landesstraße eine Autobahn überführt und die B- und C-Brücken Talbrücken unterschiedlicher Länge repräsentieren. Die A-Brücken werden in verschiedenen Varianten untersucht: eine Integralbrücke, eine Zweifeldbrücke in Stahl-Verbundbauweise und eine Zweifeldbrücke ausgeführt in Stahlbeton. Die Talbrücken sind Stahl-Verbundhohlkastenkonstruktionen.

Bei allen Brücken zeigt sich, dass der Anteil der Herstellungskosten an den gesamten Lebenszykluskosten im Durchschnitt bei 70 % liegt, wobei ein realer Diskontierungszinssatz von 2 % Verwendung findet. Bei den Wirkungskategorien der Ökobilanz ergeben sich in der Herstellungsphase Anteile zwischen 60 % und 83 % der potentiellen Umweltwirkungen bezogen auf den gesamten Lebenszyklus. Diese Ergebnisse belegen, dass verglichen mit Hochbauten die Herstellungsphase bei Brücken einen deutlich größeren Einfluss auf die Höhe des Gesamtergebnisses hat.

Die Analysen verschiedener Instandhaltungsstrategien führen bei den drei Brückentypen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Bei den A-Brücken erzeugt die gezielte Alterung die geringsten Lebenszykluskosten, wobei der Kostenvorteil gegenüber der zustandsbestimmten Strategie sehr gering ist. Gleichzeitig sind die Zustandsnoten bei Verwendung der zustandsbestimmten Strategie deutlich besser, so dass eine uneingeschränkte Nutzung möglich und eine Verlängerung des Lebenszyklus bei Fortführung der Instandhaltungsmaßnahmen durchführbar ist. Bei den B- und C-Brücken führt die zustandsbestimmte Strategie zu den geringsten Lebenszykluskosten.

Bei der Analyse der externen Kosten ist in allen Fällen die zustandsbestimmte Strategie am vorteilhaftesten. Die bei dieser Strategie durchgeführte Bündelung von Baumaßnahmen trägt entscheidend zur Reduzierung externer Kosten bei, da Bauzeiten und damit Verkehrsbehinderungen minimiert werden. Bei den A-Brücken beträgt der externe Kostenvorteil der zustandsbestimmten Strategie verglichen mit der Präventivstrategie zwischen 7 % und 17 %, bei den Brücken B und C ergibt sich ein prozentualer Vorteil zwischen 15 % und 23 %, je nachdem welcher Autobahntyp für die Analysen zu Grunde gelegt wird.

Eine weitere Reduzierung externer Kosten in der Nutzungsphase kann erreicht werden, wenn die Dauerhaftigkeit von Bauteilen verbessert wird und damit weniger Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt werden müssen. Als Beispiel kann die Feuerverzinkung von Stahlverbundträgern oder die Ausführung dieser in wetterfestem Stahl genannt wer-

den, wodurch eine Verringerung der externen Kosten zwischen 12 % und 15 % erreicht werden kann.

Externe Kosten sind immer abhängig von der Verkehrssituation der angrenzenden Straßen, weshalb in dieser Arbeit vier Autobahntypen mit verschiedenen Verkehrsbelastungen, Schwerverkehrsanteilen und Verkehrsganglinien definiert werden. Die Pendlerautobahn führt dabei aufgrund des sehr hohen durchschnittlichen täglichen Verkehrs von 100.000 Fahrzeugen/Tag zu exponentiell steigenden externen Kosten, da schon bei geringen Kapazitätsreduzierungen in Spitzenstunden Verkehrsstaus entstehen. Wenn keine Verkehrsstaus auftreten, ist der Zusammenhang zwischen der Höhe der externen Kosten und der Verkehrsstärke annähernd linear, da externe Kosten dann vorwiegend von dem erhöhten Zeitaufwand zum Durchfahren der Baustelle bestimmt werden.

## 8.2 Methodische Erkenntnisse

Alle Eingangswerte werden in der vorliegenden Arbeit auf Bauteilebene abgebildet. Dieses Vorgehen ist erforderlich, um dieselben Systemgrenzen für ökonomische und ökologische Berechnungen zu gewährleisten. Gleichzeitig müssen auf die Baumaßnahmen abgestimmte Bauzeiten definiert werden, um die externe Kostenrechnung durchführen zu können. Eine integrale und tatsächliche Zusammenhänge nicht vernachlässigende Analyse erfordert damit eine detaillierte Beschreibung des Bauteillebenszyklus, eine pauschale Berücksichtigung führte zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Dies ist beispielsweise an dem Vergleich der modellgestützten Berechnung mit den Berechnungsvorschriften der Ri-Wi-Brü erkennbar, die einen pauschalen Ansatz zur Beschreibung der Instandhaltungskosten in der Nutzungsphase verwendet. Je nach untersuchter Brücke decken sich die Ergebnisse beider Berechnungsmethoden oder überschätzt die Ri-Wi-Brü die Ergebnisse des bauteilbezogenen Modells leicht bis deutlich. Eine Anwendung dieser Richtlinie im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen ist damit nur bedingt empfehlenswert.

Zur Berechnung aller externen Effekte findet ein makroskopisches deterministisches Verkehrsmodell Anwendung, das auf bestehenden Ansätzen aufbaut und auf die besonderen Anforderungen von brückenbezogenen Nachhaltigkeitsanalysen angepasst wird. Dieses Modell ist gut geeignet, um Berechnungen für den gesamten Lebenszyklus durchführen zu können, da notwendige Eingangsdaten (Verkehrsstärke, Schwerverkehrsanteil, Verkehrsführung, Verkehrsganglinien etc.) mit ausreichendem Detaillierungsgrad zur Verfügung gestellt werden können. Aufgrund der teilweise großen Bedeutung von externen Effekten

für das Gesamtergebnis und der nichtlinearen Zusammenhänge zwischen Eingangsparametern und Ergebnissen ist eine modellgestützte Berechnung erforderlich.

Diese hat darüber hinaus den Vorteil, dass Ergebnisunsicherheiten analysiert werden können. In dieser Arbeit wird für die deterministischen Berechnungen mit einem minimalen Bauzeitenansatz gerechnet, so dass die Ergebnisse verglichen mit den probabilistischen Analysen als ein unterer Grenzwert mit einem Signifikanzniveau von 5% angesehen werden können. Sollen andere Quantile verwendet werden, können diese mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen bestimmt werden. Die durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen zeigen, dass die sich ergebenden Gesamtergebnisse der externen Kosten im Lebenszyklus einer Brücke durch eine Normalverteilung approximiert werden können.

Zur ganzheitlichen Bewertung von Infrastrukturen sind Variantenvergleiche von Brücken mit derselben Bauaufgabe zielführend. Eine Analyse desselben Bauwerks gebaut an zwei verschiedenen Standorten mit unterschiedlichen Verkehrssituation kann zu deutlichen Ergebnisunterschieden führen. Damit sind auch Vergleichswerte nicht allgemeingültig bestimmbar. Für Nachhaltigkeitsanalysen von Brücken ist damit eine standortgebundene Relativbewertung ein geeigneter Bewertungsansatz.

Externe Effekte können auf zwei Wegen in einem Bewertungssystem berücksichtigt werden. Zum einen ist eine Umrechnung der externen Effekte in externe Kosten und die Gegenüberstellung mit den Lebenszykluskosten möglich. Zum anderen können externe Umwelteffekte ökobilanziell bewertet werden. Während externe Umwelteffekte verglichen mit den bauwerksbezogenen Auswirkungen ungefähr in derselben Größenordnung liegen, spielen monetarisierte externe Umwelteffekte für das Ergebnis der externen Gesamtkosten kaum eine Rolle. Die Art der Integration vor allem der externen Umwelteffekte in ein Bewertungssystem ist damit entscheidend dafür, welches Gewicht externe Effekte im Vergleich zu bauwerksbezogenen Aspekten haben.

### **8.3 Umsetzungsempfehlungen**

Alle Ergebnisse zeigen, dass durch die Berücksichtigung von externen Effekten Wohlfahrtsverluste vermieden werden können. Daher sollten Nachhaltigkeitsaspekte konsequent in Planungsprozesse und Ausschreibungsverfahren integriert werden. Ein erster Schritt wird durch die Diskussion und Definition eines Bewertungssystems gemacht, auf dessen Grundlage verschiedene Planungsvarianten beurteilt werden können. In Abhängigkeit davon, wer die Anwender dieses Bewertungssystems sein sollen, müssen unterschied-



liche Indikatoren zum Einsatz kommen. Eine Möglichkeit, modellgestützte Variantenvergleiche in die Bewertungspraxis zu integrieren, ist die Erstellung einer Software, in der Berechnungsalgorithmen hinterlegt sind und die vorbilanzierte, typische Brückenbauteile enthält.

Den Diskurs begleitend sollten Beispielprojekte durchgeführt werden, bei denen unterschiedliche Systemgestaltungen erprobt werden. Auch die beispielhafte Nutzung der bereits auf dem Markt existierenden Nachhaltigkeitsbewertungssysteme CEEQUAL, Envision und dem Infrastructure Rating Scheme ist denkbar. Dabei ist eine Anwendung in einer frühen Planungsphase von Bedeutung. Eine Bewertung der fertiggestellten Brücke und die Vergabe eines Gütesiegels sind nicht zielführend, da durch das Gütesiegel kein Mehrwert auf dem Markt geschaffen wird und die Herstellungskosten, die wie gezeigt bei Brücken eine sehr große Bedeutung besitzen, nicht mehr beeinflussbar sind.

Um ein Nachhaltigkeitsbewertungssystem in der täglichen Praxis zu manifestieren, sind weitere Schritte erforderlich. Ein Ansatzpunkt kann die Gestaltung von Verträgen sein. So könnten Funktionsbauverträge verstärkt zum Einsatz kommen. Dies alleine ist aber kein Garant für die konsequente Berücksichtigung volkswirtschaftlicher Aspekte, da bei Öffentlich-Privaten-Partnerschaften (ÖPP) in erster Linie eine Optimierung der Lebenszykluskosten stattfindet. Es müssten damit zusätzlich Maßnahmen zur Minimierung von Verkehrsbeeinträchtigungen vertraglich vereinbart werden.

Abschließend sollte ein ausreichendes Budget eingeplant werden, da die Durchführung der Nachhaltigkeitsanalysen durch die Planungsbeteiligten einen Mehraufwand verursacht. Nur durch eine entsprechende Vergütung kann eine ausreichende Qualität der Analysen gewährleistet werden. Des Weiteren kann die Optimierung der Lebenszykluskosten bzw. externen Kosten dazu führen, dass höhere Herstellungskosten entstehen, wenn beispielsweise Bauteile mit längeren Erneuerungszyklen wie Fingerübergänge, Kalottenlager oder Verbundträger in WT-Stahl zur Ausführung kommen sollen.

## 8.4 Forschungsbedarf

Der in dieser Arbeit verwendete Untersuchungsrahmen definiert die Phase der Entwurfs- und Genehmigungsplanung als Anwendungszeitpunkt für die Analysen und es werden vor allem modellgestützte Berechnungsverfahren verwendet. Nachhaltigkeitsaspekte sollten allerdings auch in weitere Planungsphasen wie der Vorplanung oder der Ausschreibung und Vergabe Eingang finden. Die durchgängige Verwendbarkeit von Indikatoren in

verschiedenen Planungsphasen und die jeweils zur Verfügung stehenden Eingangsdatenqualität ist daher ein wichtiger zukünftiger Untersuchungsansatz.

Alle Betrachtungen in dieser Arbeit beziehen sich ausschließlich auf einzelne Brückenbauwerke, wobei vor allem bei der Definition der Instandhaltungsszenarien mögliche Abhängigkeiten, die sich bei zusätzlicher Berücksichtigung von Straßenzügen ergeben würden, vernachlässigt werden. Ein nächster Analyseschritt müsste daher die Untersuchung einer Verbindung bzw. Trasse sein, bei der die Baumaßnahmen unterschiedlicher Infrastrukturarten (Straßen, Brücken, Tunnel) aufeinander abgestimmt werden. In einem weiteren Schritt kann die Berechnung auf Netzebene erfolgen, bei der vor allem Verkehrsumlagerungen in die Untersuchungen integriert werden.

Alle Berechnungen haben das Ziel, eine Bewertung zu ermöglichen. Durch Variantenvergleiche werden dabei die Auswirkungen unterschiedlicher Eingangswerte auf das Ergebnis veranschaulicht. Optimierungsalgorithmen beispielsweise mit dem Ziel der Minimierung der Lebenszykluskosten werden in dieser Arbeit nicht verwendet und könnten in einem nächsten Schritt entwickelt werden. Optimierungen sind vor allem von Interesse, falls Restriktionen in die Analysen integriert werden sollen. Wenn beispielsweise die Untersuchung eines Bauwerksportfolios erfolgt und eine Budgetrestriktion existiert (maximal zur Verfügung stehende jährliche Gelder), wird eine optimale Strategie für ein Bauwerksportfolio andere Ergebnisse erzeugen als die Analyseergebnisse für ein Einzelbauwerk.

Abschließend muss beachtet werden, dass die vorliegenden Untersuchungen sich nur auf Straßenbrücken beziehen. So wird eine Nachhaltigkeitsanalyse beispielsweise von Bahnbrücken durch die organisatorisch stark unterschiedliche Einbindung eine angepasste Bewertungssystematik erfordern. Da die Deutsche Bahn gleichzeitig als Betreiber und Bauherr für ihr Streckennetz zuständig ist, hat sie ein großes Interesse an der Minimierung von Ausfallzeiten und es findet eine darauf ausgerichtete Planung von Instandhaltungsmaßnahmen statt. Die stark unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Infrastrukturtypen erfordern daher jeweils eigenständige Bewertungssysteme.

## **Anhang A: Glossar**

### **Vorbemerkungen**

Die Lebenszeit von Bauwerken beschreibende Begriffe sind größtenteils in den Normen zum Themenfeld „Nachhaltigkeit im Bauwesen“ definiert, dessen Einführung im Jahr 2010 begann. Aufgrund des vergleichsweise jungen Charakters und zur Vorbeugung von Missverständnissen wird an dieser Stelle eine ausführliche Begriffsdefinition und -abgrenzung vorgenommen.

Alle Begriffe werden in der vorliegenden Arbeit einheitlich verwendet und bilden die Grundlage für eine differenzierte Darstellung der Inhalte. Die Erläuterungen sind in Themenbereiche geordnet und die Einzelbegriffe bauen aufeinander auf. Daher sind die Begriffserklärungen nicht in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt.

## A.1 Begriffe zur Beschreibung des Lebenszyklus

### **Lebenszyklus**

Unter dem Begriff werden alle Phasen während der gesamten Lebensdauer eines Bauwerks zusammengefasst, wobei die einzelnen Phasen sich gegenseitig beeinflussen (DIN EN 15643-1: 2010). Der Lebenszyklus beginnt dabei mit der Bauproduktherstellung und endet mit dem Rückbau des Betrachtungsgegenstandes.

### **Nutzungsdauer**

Die Nutzungsdauer (auch als Gebrauchsdauer bezeichnet) ist ein Teil des Lebenszyklus, in dem die technischen und funktionalen Anforderungen an Bauwerke oder Bauwerksteile mindestens erfüllt werden. Sowohl DIN EN 15643-1 (2010) als auch E DIN EN ISO 15392 (2011) verwenden diese Definition.

### **Referenz-Nutzungsdauer (voraussichtliche bzw. geplante Nutzungsdauer)**

Die Bestimmung einer Nutzungsdauer ist nicht ohne Weiteres möglich. Daher wird der Begriff der *Referenz-Nutzungsdauer* für Bauprodukte (DIN EN 15643-1: 2010) bzw. der *voraussichtlichen Nutzungsdauer* für Gebäude oder Gebäudeteile (DIN EN 15978: 2012) eingeführt. In beiden Fällen wird anhand von definierten Nutzungsbedingungen und Referenzdaten eine Zeitspanne ermittelt, die als Nutzungsdauer-Eingangswert für Berechnungen verwendet werden kann. Für Tragwerke wird in der DIN EN 1990 (2010) der Begriff der *geplanten Nutzungsdauer* eingeführt, auf deren Grundlage vor allem die Bestimmung von charakteristischen Einwirkungen stattfindet. Alle Bezeichnungen haben gemeinsam, dass sie auf Erfahrungen aufbauende, theoretische Werte für Nutzungsdauern charakterisieren.

### **Erhaltungszeitraum**

Dieser Begriff ist eine nicht normativ geregelte Bezeichnung, die verwendet wird, um die Ergebnisse der in dieser Arbeit durchgeführten Realdatenanalyse eindeutig zu klassifizieren. Mit dem Begriff der Erhaltungszeiträume werden die in der Realdatenanalyse empirisch ermittelten Zeiträume bezeichnet, die die Zeitspanne zwischen Bauteileinbau und Bauteilerneuerung beschreiben. Diese Erhaltungszeiträume sind ein Eingangswert zur Bestimmung der Erneuerungszyklen.

### **Erneuerungszyklus**

Die Erneuerungszyklen sind theoretische Werte, die für den Anwendungsfall der Nachhaltigkeitsanalyse von Brücken bestimmt werden und normativ nicht definiert sind. Die Festlegung erfolgt für einen Lebenszyklus von 100 Jahren und unter Berücksichtigung

der empirisch ermittelten Erhaltungszeiträume, Literaturangaben und Expertenaussagen. Erneuerungszyklen beschreiben den theoretischen Zeitraum zwischen dem Einbau und dem Komplettaustausch von Bauteilen bzw. Bauteilgruppen. Sie werden an den Zielen der jeweiligen Instandhaltungsstrategie ausgerichtet und sind damit szenarienabhängig.

## A.2 Begriffe zur Beschreibung der Instandhaltung

### **Instandhaltung**

Der Begriff zur Beschreibung und Einteilung der Instandhaltung ist in Deutschland nicht einheitlich geregelt, alle Ansätze haben aber gemeinsam, dass sie Maßnahmen zum Erhalt von Bauwerken und Bauteilen während ihrer Nutzungsdauer definieren. Hier wird die DIN 31051 (2012) zu Grunde gelegt, nach der Instandhaltung definiert ist als *„Kombination aller technischen und administrativen Maßnahmen sowie Maßnahmen des Managements während des Lebenszyklus einer Einheit, die dem Erhalt oder der Wiederherstellung ihres funktionsfähigen Zustands dient, sodass sie die geforderte Funktion erfüllen kann.“* Die Instandhaltung kann in die Einzelmaßnahmen der Inspektion, Wartung, Instandsetzung und Verbesserung unterteilt werden.

### **Inspektion**

Inspektionen dienen der Festlegung und Beurteilung des Istzustandes. Des Weiteren ist die Bestimmung der Ursachen für eine Abnutzung sowie das Ableiten von Auswirkungen auf eine zukünftige Nutzung Teil einer Inspektion (DIN 31051: 2012). Für Ingenieurbauwerke findet eine Erweiterung des Begriffs statt, siehe Definitionen zur einfachen Prüfung und Hauptprüfung weiter unten.

### **Wartung**

Wartungsmaßnahmen bezwecken eine Verzögerung der Abnahme des Abnutzungsvorrates (DIN 31051: 2012). Für Brücken kann als Wartungsmaßnahme beispielsweise das Befreien der Widerlager von Bewuchs oder das Spülen von Entwässerungsanlagen genannt werden.

### **Instandsetzung**

Eine Instandsetzung beinhaltet Maßnahmen größeren Umfangs zur Rückführung in einen funktionsfähigen Zustand (DIN 31051: 2012), wie z. B. die Ausbesserung eines Korrosionsschutzsystems. Vor allem die Abgrenzung zum Begriff der Erneuerung muss beachtet werden.

### **Erneuerung**

In Anlehnung an HAARDT (2003) wird zur Erweiterung des Begriffs der Instandsetzung der Begriff der Erneuerung verwendet, der den kompletten Austausch eines Bauteils und die Rückführung in den ursprünglichen Zustand beschreibt. Als Beispiel kann die Erneuerung der Übergangskonstruktionen oder Brückenlager genannt werden, die im Rahmen von Austauschmaßnahmen stattfinden. Erneuerungen sind damit eine Teilmenge von Instandsetzungsmaßnahmen.

### **Einfache Prüfung, Hauptprüfung**

Als Erweiterung des Begriffs der Inspektion finden die in DIN 1076 (1999) definierten Maßnahmen der *einfachen Prüfung* (alle drei Jahre) und *Hauptprüfung* (Durchführung vor Abnahme der Bauleistung, vor Ablauf der Verjährungsfrist und danach alle sechs Jahre) Anwendung. Sie sind infrastrukturenspezifische Prüfungen zum Auffinden von Mängeln oder Schäden und unterscheiden sich in ihrem Durchführungsaufwand.

### **Instandhaltungsstrategie**

Mit den oben genannten Maßnahmen kann eine Instandhaltungsstrategie definiert werden, die eine „*Vorgehensweise des Managements zur Erreichung der Instandhaltungsziele*“ ist (DIN EN 13306: 2010). In dieser Arbeit werden die drei Instandhaltungsstrategien der präventiven Instandhaltung, der zustandsbestimmten Instandhaltung und der gezielten Alterung verwendet. Die jeweiligen Zieldefinitionen finden sich in Abschnitt 4.1.2.

## **A.3 Wirkungskategorien der Ökobilanzierung**

### **Treibhauspotential**

Das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) fasst alle chemischen Verbindungen zusammen, die einen Beitrag zum Treibhauseffekt und damit zur Erwärmung der Erdoberfläche leisten. Die Erwärmung entsteht, da langwellige Sonnenstrahlung durch Treibhausgase in der Erdatmosphäre gehalten werden. Als Vergleichswert dient die Leitsubstanz  $\text{CO}_2$ , auf dessen potentielle Wirkung alle weiteren Verbindungen durch die Festlegung von Charakterisierungsfaktoren bezogen werden. Häufig findet ein Bezug auf die mittlere Erwärmungswirkung in dem Zeitraum von 100 Jahren statt, der dann zu der Bezeichnung GWP 100 führt. Die Wirkungskategorie Treibhauspotential wird in der Einheit [kg  $\text{CO}_2$ -Äquivalente] angegeben.

### **Ozonschichtabbaupotential**

Das Ozonschichtabbaupotential (Ozone Depletion Potential, ODP) summiert alle Verbindungen, die einen potentiellen Beitrag zum Abbau der Ozonschicht leisten. Dieser Abbau hat eine Zunahme der UV-A- und UV-B-Strahlung zur Folge und trägt zu einer Erhöhung der Temperaturen in der Atmosphäre bei. Als Leitsubstanz wird die Verbindung Trichlorfluormethan (auch bezeichnet als R11) verwendet, die zu der Gruppe der Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) gehört und als Kältemittel eingesetzt wird. Die Wirkungskategorie Ozonschichtabbaupotential wird in der Einheit [kg R11-Äquivalente] angegeben.

### **Ozonbildungspotential**

Das Ozonbildungspotential (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP) wird auch als photochemische Oxidation oder Sommersmog bezeichnet und ist ein Maß für die Bildung von Ozon in bodennahen Luftschichten, das humantoxische Eigenschaften besitzt. Als Leitsubstanz wird Ethen verwendet, als Bezug kommt folglich die Einheit [kg  $C_2H_4$ -Äquivalente] zur Anwendung.

### **Versauerungspotential**

Das Versauerungspotential (Acidification Potential, AP) erfasst alle Verbindungen, die bei chemischer Reaktion und ggf. in Verbindung mit Wasser eine Herabsetzung des pH-Wertes von Böden und Gewässern erzeugen. Vor allem sind dies Schwefeldioxyde ( $SO_2$ ) und Stickoxide ( $NO_x$ ), die auch bei der Kraftstoffverbrennung von Motoren entstehen. Diese Wirkungskategorie hat durch das Waldsterben in den 1980er Jahren Bekanntheit erlangt. Auch in dieser Wirkungskategorie werden die Auswirkungen auf die potentielle Wirkung einer Leitsubstanz umgerechnet, welche Schwefeldioxyd  $SO_2$  ist. Daraus ergibt sich die Einheit [kg  $SO_2$ -Äquivalente].

### **Überdüngungspotential**

Das Überdüngungspotential (Eutrophication Potential, EP) fasst alle Verbindungen zusammen, die einen Beitrag zum Nährstoffeintrag in Böden und Gewässer leisten. Werden zu hohe Konzentrationen des Nährstoffangebots erreicht, findet beispielsweise in Gewässern ein starkes Algenwachstum statt, das große Mengen an Sauerstoff verbraucht und zu Sauerstoffmangel (anaerobe Bedingungen) führt, der in der Konsequenz u. a. zu einem Fischsterben führen kann. Die vorwiegend zu dieser Wirkungskategorie beitragenden Verbindungen sind Stickstoff und Phosphate, weswegen als Leitsubstanz  $PO_4$  verwendet wird, womit sich als Einheit für diese Wirkungskategorie [kg  $PO_4$ -Äquivalente] ergibt.

### **Primärenergiebedarf nicht erneuerbar**

Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PEne) ist ein Indikator der Ressourceninanspruchnahme und gibt alle in Primärenergie umgerechneten Energieverbräuche an, die aus nicht erneuerbaren Quellen stammen. Nicht erneuerbare Energiequellen sind beispielsweise Steinkohle, Erdöl oder Erdgas. Im Rahmen der Angabe als Primärenergie werden alle Prozessketten bis zur Energiebereitstellung miteinbezogen. Als Einheit wird [MJ] verwendet.

### **Gesamtprimärenergiebedarf**

Der Gesamtprimärenergiebedarf (PE) beschreibt ebenfalls die Ressourceninanspruchnahme und ist die Summe der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergie (siehe oben). Erneuerbare Energien werden aus Wasser- und Windkraft, Solarenergie und Biomasse gewonnen. Die Einheit ist ebenfalls [MJ].



## **Anhang B: Vergleich und Charakterisierung bestehender Nachhaltigkeitsbewertungsansätze**

## B.1 Marktorientierte Infrastrukturbewertungsansätze

Beschreibung		Schwerpunkt in Dimension			Anwendung in Phase		verwendete Methoden			Art der Infrastrukturbauwerke						
Quelle bzw. Autor	Jahr	Land	ökonomisch	ökologisch	sozial	Entwurf#	Planung, Bau	nach Fertigstellung	Indikatorenliste	Wichtungsfaktoren	LCC	LCA	weitere Methoden	Bridges	Verkehrsinfrastr.	weitere Spezifizierung
CEEQUAL	2003	England	(x)	x	(x)	x	x	x	ja	ja	nein	nein	MCDM	-	-	Infrastrukturprojekte
Evision	2012	USA	(x)	x	x	-	(x)	x	ja	ja	nein	nein	MCDM	-	-	Infrastrukturprojekte
AGIC (Sprigg)	2012	Australien	(x)	x	x	-	x	x	ja	ja	nein	nein	MCDM	-	-	Infrastrukturprojekte
Greenroads*	2007	USA	x	x	x	-	(x)	x	ja	ja	ja	ja	MCDM	-	x	Straßen

# Phase, in der die Grundlagenermittlung und Vorplanung stattfindet  
 \* Beispielhafte Nennung für ein Straßenbaubewertungssystem, Gesamtübersicht in Abb. 1.8  
 x = Kategorie wird erfüllt, (x) = Kategorie wird partiell erfüllt  
 MCDM = Multi-Criteria Decision Making

## B.2 Forschungsorientierte Infrastrukturbewertungsansätze

Beschreibung		Schwerpunkt in Dimension			Anwendung in Phase			verwendete Methoden			Art der Infrastrukturbauwerke			
Quelle bzw. Autor	Jahr	Land	ökonomisch	ökologisch	sozial	Entwurf#	Planung, Bau	nach Fertigstellung	Indikatorenliste	Wichtungsfaktoren	LCC	weitere Methoden	Bridges	weitere Spezifizierung
Fogib	1997	Deutschland	x	x	x	x	(x)	-	ja	nein	ja	AHP	x	(x)
SBRI	2013	Europa	x	x	x	x	(x)	-	nein	nein	ja	-	x	-
ETSI	2009	Finnland	x	x	x	(x)	x	-	nein	nein	ja	soz. Kosten, Ästhetik	x	-
Dissertation Gervasio	2010	Portugal	x	x	x	x	(x)	-	nein	nein	ja	MCDM, Unsicherheiten, Nutzerkosten	x	-
NaBrü (Kuhlmann et al.)	2014	Deutschland	x	x	x	x	(x)	-	nein	nein	ja	Unsicherheiten, externe Kosten	x	(x)

# Phase, in der die Grundlagenermittlung und Vorplanung stattfindet  
 x = Kategorie wird erfüllt, (x) = Kategorie wird partiell erfüllt  
 AHP = Analytic Hierarchy Process  
 MCDM = Multi-Criteria Decision Making

### B.3 Indikatorensysteme für die Infrastrukturbewertung

Beschreibung		Schwerpunkt in Dimension		Anwendung in Phase		verwendete Methoden			Art der Infrastrukturbauwerke				
Quelle bzw. Autor	Jahr Land	ökono-	lo-	Ent-	Pla-	nach-	Indika-	weitere	Ver-	weitere Spe-			
		misch	gisch	wurf#	nung,	Fertig-	toren-	LCC	kehr-	zifizierung			
		sozial		Bau-	stellung	list	Wich-	LCA	infra-				
						te	faktoren	Methoden	struk-				
									tur-				
									projekte				
Hendy	2012 England	x	x	x	x	-	ja	ja	nein	MCDM	x	-	-
Graubner	2010 Deutschland	x	x	x	-	x	ja	ja	nein	nein	x	-	-
Dasgupta	2005 Kanada	-	x	x	-	-	nein	ja	nein	nein	-	-	Elektrizitäts-
Griffiths	2007 Neuseeland	-	x	x	-	-	ja	ja	nein	nein	-	-	netze
Koo	2009 USA	x	x	x	-	-	ja	ja	nein	nein	-	-	Öffentliche
López	2011 Spanien	x	x	x	-	-	ja	ja	nein	nein	-	-	Infrastrukturen
Sahely	2005 Kanada	x	x	x	nicht spez.	-	ja	nein	nein	nein	-	-	Unter Tagebau
Sánchez	2010 Spanien	x	x	x	nicht spez.	-	ja	nein	nein	nein	-	-	Infrastruktur-
Ugwu	2006 Hong Kong	x	x	x	(x)	-	ja	ja	nein	nein	-	-	projekte
Willeits	2010 UK	x	x	x	nicht spez.	-	ja	nein	nein	nein	-	-	Infrastruktur-
Yao	2011 Hong Kong	x	x	x	-	x	ja	nein	nein	nein	-	-	projekte

# Phase, in der die Grundlagenermittlung und Vorplanung stattfindet  
x = Kategorie wird erfüllt, (x) = Kategorie wird partiell erfüllt  
nicht spez. = Anwendungsphase nicht spezifiziert  
AHP = Analytic Hierarchy Process  
MCDM = Multi-Criteria Decision Making

## B.4 Normative Infrastrukturbewertungsansätze

Beschreibung		Schwerpunkt in Dimension			Anwendung in Phase			verwendete Methoden			Art der Infrastrukturbauwerke					
Quelle bzw. Autor	Jahr	Land	ökonomisch	ökologisch	sozial	Entwurf#	Planung, Bau	nach Fertigstellung	Indikatorenliste	Wichtungsfaktoren	LCA	weitere Methoden	Bridges	Verkehrsinfrast.	weitere Spezifizierung	
ISO/TS 21929-2	2015	weltweit	x	x	x	x	x	x	nein	nein	ja	ja	externe Kosten, Resilienz	-	-	Civil Engineering Works
Directive 2004/18/EC	2004	Europa	x	-	-	-	x	-	(ja)	nein	nein	nein	-	-	-	öffentl. Ausschreibungen
HVA B-StB	2009	Deutschland	x	-	-	-	x	-	(ja)	nein	nein	nein	-	x	x	-
RI-WI-BRÜ	2007	Deutschland	x	-	-	x	-	-	ja	nein	ja	nein	-	x	-	-
EWS	1997	Deutschland	-	-	x	x	-	-	ja	ja	nein	nein	externe Kosten	-	x	-

# Phase, in der die Grundlagenmittlung und Vorplanung stattfindet  
 x = Kategorie wird erfüllt  
 (ja) = Indikatoren werden beispielhaft vorgeschlagen



## Anhang C: Empirische Analyse Erhaltungszeiträume

### Vorbemerkungen

Die Ergebnisse der empirischen Analysen zu den Erhaltungszeiträumen werden gruppiert für die einzelnen Datenabfragen aus der Datenbank SIB-Bauwerke dargestellt. Die Abfragespezifikationen sind:

- Zweifeld-Balkenbrücken mit 40-60 m, Autobahn unten liegend, siehe Anhang C.1
- Mehrfeld-Hohlkastenbrücken, Stützweite 30-40 m, Bundesstraße oben liegend, siehe Anhang C.2
- Mehrfeldbrücken, Länge größer 100 m, Autobahn oben liegend, siehe Anhang C.3
- Verformungslager für Brücken mit einer Länge größer 100 m, siehe Anhang C.4
- Stahllamellen-Fahrbahnübergänge, 1-3 Lamellen, siehe Anhang C.5

Bei allen auf eine Brückenart bezogenen Ergebnissen werden nur diejenigen Bauteilgruppen dargestellt, deren Datensatz-Grundgesamtheit eine Auswertung zulässt.

Für die Bauteilgruppe der Ausstattung werden die Komponenten Entwässerungen und Schutzeinrichtungen ausgewertet. Um die Auswertung zu ermöglichen, muss die Grundgesamtheit erhöht werden, indem die Ergebnisse der drei brückenspezifischen Abfragen zusammengelegt werden. Die Ergebnisse finden sich in Anhang C.6.

## C.1 Ergebnisse Zweifeld-Balkenbrücken

### C.1.1 Fahrbahnübergangskonstruktionen

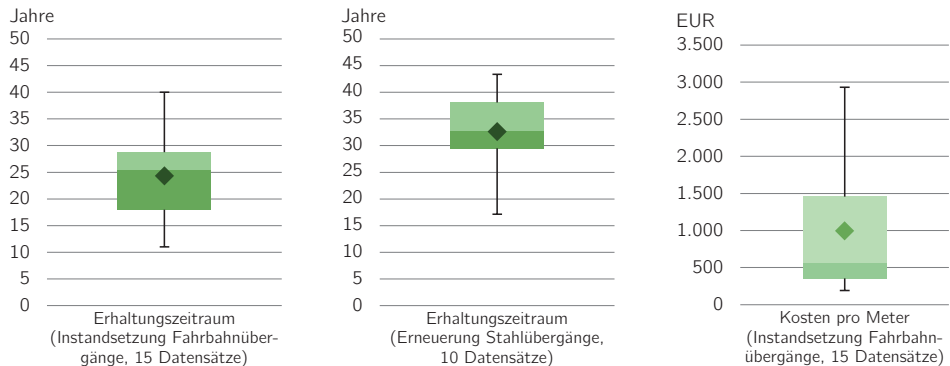


Abbildung C.1: Erhaltungszeiträume für Fahrbahnübergänge von Zweifeldbrücken unterteilt nach Instandsetzungsmaßnahmen (links) und Erneuerungsmaßnahmen (Mitte), zusätzlich Instandsetzungskosten pro Meter Länge der Fahrbahnübergangskonstruktion (rechts)

#### Deutung:

Die Datenbasis für Fahrbahnübergangskonstruktionen der Zweifeld-Balkenbrücken besteht aus insgesamt 25 auswertbaren Datensätzen. Die getrennte Auswertung der Maßnahmen „Instandsetzung“ und „Erneuerung“ zeigt, dass sich im Median deutliche Unterschiede von 7 Jahren ergeben, so dass die Instandsetzungsmaßnahmen als kleinere Maßnahmen mit einem geringeren Erhaltungszeitraum klassifiziert werden können.

Die Auswertung der in der Datenbank hinterlegten Kosten ist nur für die Instandsetzungsmaßnahmen möglich, da nur hier eine ausreichende Anzahl an vollständigen Datensätzen existiert. Es ist zu erkennen, dass vom Median von 566 EUR/(m-Üko-Länge) vor allem deutliche Abweichungen nach oben auftreten, obwohl das Ergebnis schon auf die Länge der Fahrbahnübergangskonstruktion bezogen ist. So ergibt sich auch nur eine Korrelation von 0,26 zwischen dem Erhaltungszeitraum und den Kosten für die jeweilige Instandsetzungsmaßnahme. Ein Grund könnte die Zuordnung von verschiedenen Maßnahmenarten zu einer Maßnahmenkategorie sein und ggf. werden Kosten für mehrere Maßnahmen in einer zusammengefasst. Hierauf deutet die bei einigen Datensätzen existierende Erläuterung hin. Dieses Ergebnis bezüglich der Qualität der in der Datenbank SIB-Bauwerke hinterlegten Kosten ist auch bei den übrigen Bauteilgruppen zu beobachten, so dass Kosten im Weiteren nicht analysiert werden.



### C.1.2 Lager

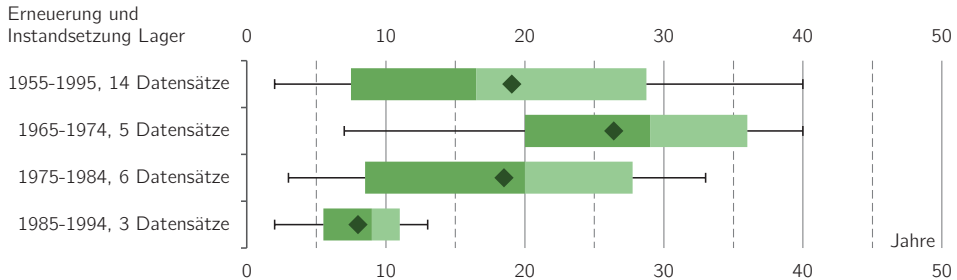


Abbildung C.2: Erhaltungszeiträume für Lager von Zweifeldbrücken, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Die insgesamt zur Verfügung stehenden 14 Datensätze für die Instandsetzung und Erneuerung von Lagern abgestimmt auf die Zweifeld-Balkenbrücken müssen als sehr kleine Datengrundlage eingestuft werden. Daher werden beide Maßnahmenarten zusammen ausgewertet, was allerdings zu einer Durchmischung unterschiedlicher Maßnahmengrößen führt.

Dies ist auch an der großen Ergebnisbandbreite zu erkennen. Es ergibt sich eine deutliche Abhängigkeit von Baujahresklassen, allerdings auf einem niedrigen Niveau der Erhaltungszeiträume. Die sehr geringen Minimalwerte deuten auf eine Mängelbeseitigung hin, diese werden hier allerdings nicht herausgenommen, da ansonsten keine Auswertung der Bauteilgruppe Lager möglich wäre. Die sehr geringe Datensatzanzahl könnte einerseits mit der Nichterfassung von durchgeführten Maßnahmen zum Lagertausch und andererseits mit dem planmäßigen Nichtstattfinden von Erneuerungsmaßnahmen begründet werden. Bei der Befragung von mit der Brückeninstandhaltung beauftragten Personen wird der letzte Punkt bestätigt und es wird in den meisten Fällen von sehr langen Erhaltungszeiträumen bis zum ersten Lagertausch ausgegangen.

Als Konsequenz der geringen Aussagequalität wird eine separate und bauwerksunabhängige Abfrage zu Lagern durchgeführt, die in Anhang C.4 zu finden ist.

### C.1.3 Kappen

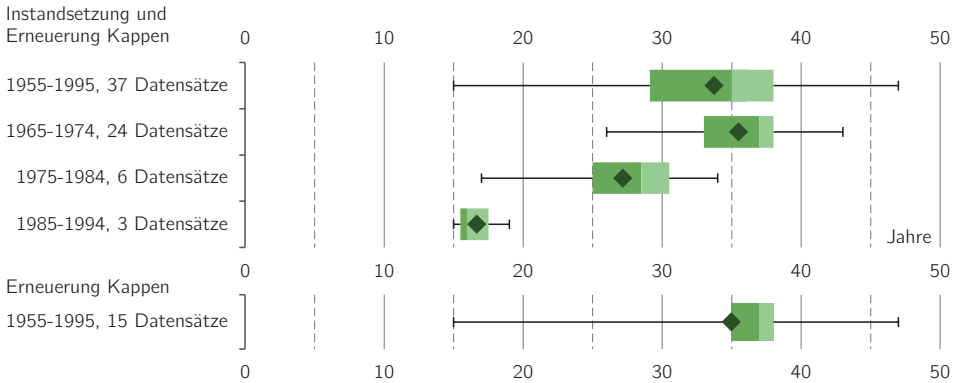


Abbildung C.3: Erhaltungszeiträume für Kappen von Zweifeldbrücken, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Für Kappen von Zweifeld-Balkenbrücken stehen bei Berücksichtigung aller Maßnahmen 37 Datensätze und bei ausschließlicher Berücksichtigung der Erneuerung 15 Datensätze zur Verfügung. Werden Instandsetzung und Erneuerung zusammen ausgewertet, ist wiederum eine deutliche Abhängigkeit der Ergebnisse vom Baujahr auszumachen. Vor allem für die Baujahresklasse 1965-1974 ergibt sich ein Median von 37 Jahren und ein Mittelwert von 36 Jahren für den Erhaltungszeitraum. Die restlichen Jahresklassen liefern deutlich kürzere Erhaltungszeiträume bei gleichzeitig deutlich verminderter Anzahl an Datensätzen.

Die alleinige Auswertung von Kappenerneuerungsmaßnahmen liefert ähnliche Werte wie die Gesamtauswertung. Eine Unterteilung in Baujahresklassen ist aufgrund der geringen Datensatzanzahl nicht möglich. Für den unterhalb des unteren Quartils liegenden Mittelwert sind vor allem zwei Maßnahmen mit Erhaltungszeiträumen von 15 respektive 17 Jahren verantwortlich. Aufgrund der regulär sehr langen Erhaltungszeiträume für die Erneuerung von Kappen hat hier entweder eine Mängelbeseitigung stattgefunden oder es ist in der Datenbank eine falsche Maßnahmenzuordnung (Zuweisung zur Maßnahmenart Erneuerung anstatt Instandsetzung) durchgeführt worden.

### C.1.4 Brüstungen und Geländer

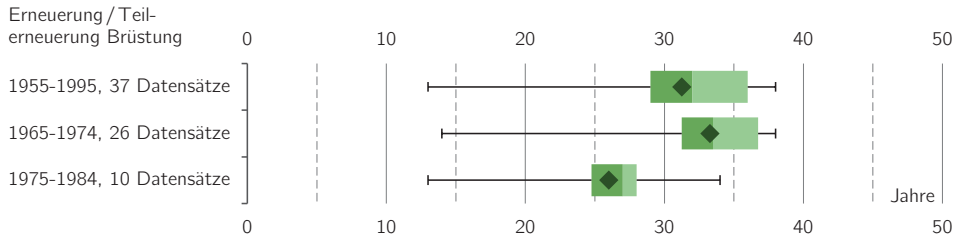


Abbildung C.4: Erhaltungszeiträume für Brüstungen von Zweifeldbrücken, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Die Bauteilgruppe der Brüstungen und Geländer steht in starker Abhängigkeit zu den Kappen, da sie bei einer Kappenerneuerung mit erneuert werden müssen. Da ein Teil der Datensätze auch Teilerneuerungen bzw. Instandsetzungen ausweist, ist davon auszugehen, dass die resultierenden Erhaltungszeiträume verglichen mit den Kappen in derselben Größenordnung liegen.

Im Vergleich mit den Ergebnissen in Anhang C.1.3 ergeben sich für die Brüstungen etwas geringere Erhaltungszeiträume, die Größenordnungen sind aber vergleichbar. Die niedrigen Minimalwerte in allen Baujahresklassen zeigen, dass Teilerneuerungen in den Datensätzen enthalten sind. Sie haben allerdings nur eine geringe Auswirkung auf die Mittelwerte, die für alle Baujahresklassen dicht an den Medianen liegen.

### C.1.5 Asphaltübergänge und Asphalt

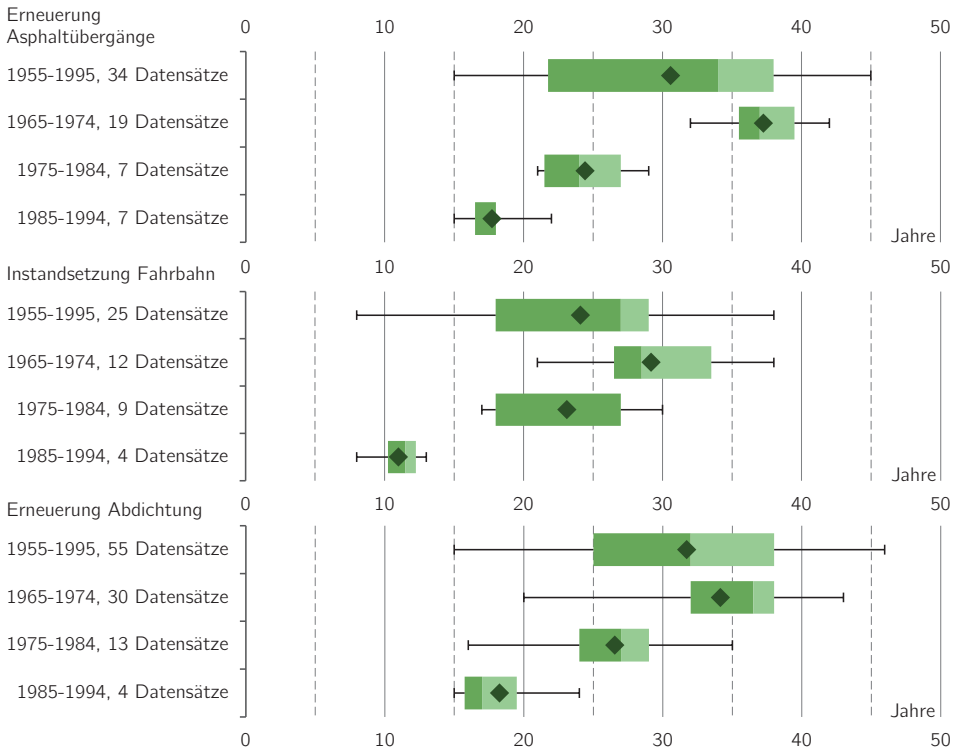


Abbildung C.5: Erhaltungszeiträume für die Erneuerung von Asphaltübergängen (oben), die Instandsetzung des Fahrbahnbelags (Mitte) und eine Abdichtungserneuerung (unten) von Zweifeldbrücken, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Die auf die Zweifeldbrücke abgestimmten Datensätze zu Asphaltübergängen haben mit 34 Datensätzen eine ausreichende Grundgesamtheit und liefern auf den ersten Blick ein ähnliches Bild wie die Ergebnisse zu Fahrbahnübergängen. Allerdings ist ersichtlich, dass die Auswertung der Baujahresklassen so gut wie keine Überschneidung von Minimal- und Maximalwerten zeigt. Es kann geschlussfolgert werden, dass hier mehrere Erneuerungszyklen zu erkennen sind, die ca. alle 10-15 Jahre durchgeführt werden. Diese Erkenntnis wird durch die sehr geringe Ergebnisstreuung unterstützt. Etwas kürzere Erhaltungszeiträume von ca. 10 Jahren liefert die Auswertung für die die Instandsetzung des Fahr-

bahnbelags, die i. d. R. zusammen mit der Erneuerung der Asphaltübergänge stattfindet. Im Maßnahmenpaket der Fahrbahninstandsetzung können allerdings auch kleinere Maßnahmen erfasst sein, die für das Herabsetzen der Erhaltungszeiträume verantwortlich sind.

Die Erhaltungszeiträume der Abdichtungserneuerung bewegen sich auch in den Baujahresklassen auf demselben Niveau wie die der Erneuerung der Asphaltübergänge. Diese zeitliche Staffelung vor allem der Ergebnisse ab 1975 ist allerdings nur bedingt erklärbar, da eine Abdichtungserneuerung im Vergleich zur Belagererneuerung in deutlich größeren Abständen stattfinden sollte. Eine Erklärung könnte eine falsche Maßnahmenzuordnung sein, da für die Fahrbahn eine große Anzahl an Baumaßnahmenarten in der ASB-ING (2008) existiert. Des Weiteren ist nach 1975 die Datensatzanzahl sehr gering, so dass hier über die Ursachen für die Ergebnisstaffelung keine abschließende Aussage getroffen werden kann.

### **C.1.6 Korrosionsschutzmaßnahmen und Betoninstandsetzungen**

Die Datenbankabfragen zur Maßnahmenart des Korrosionsschutzes liefern als Ergebnis sehr wenig Datensätze, von denen sich die Hälfte auf den Korrosionsschutz von Geländern bezieht. Durch die zu geringe Datenbasis findet hier daher keine Ergebnisdarstellung statt. Die Ableitung der Erneuerungszyklen basiert auf den Empfehlungen in VOLLRATH und TATHOFF (2002), auf die auch die RI-WI-BRÜ (2007) zurückgreift.

Zu Maßnahmen der Betoninstandsetzung sind deutlich mehr Datensätze vorhanden, sie unterteilen sich aber in sehr viele verschiedene Maßnahmenarten und weisen gleichzeitig sehr wenig Erläuterungen auf, so dass die Ergebnisse kaum zielführend verschiedenen Auswertungsgruppen zugeteilt werden können. Des Weiteren muss vor allem bei Fragen der Betoninstandsetzung beachtet werden, dass alte Bauwerke eine gegenüber den heutigen Vorschriften geringere Betondeckung aufweisen. Dies führt i. d. R. zu der Notwendigkeit von zeitlich frühen Instandsetzungen, die bei heutigen Neubauten so nicht mehr erforderlich sein werden. Die Ableitung von Erneuerungszyklen zur Definition der Instandhaltungsstrategien basiert daher zum einen auf Empfehlungen in VOLLRATH und TATHOFF (2002) sowie auf Expertenaussagen.

## C.2 Ergebnisse Mehrfeld-Hohlkastenbrücken

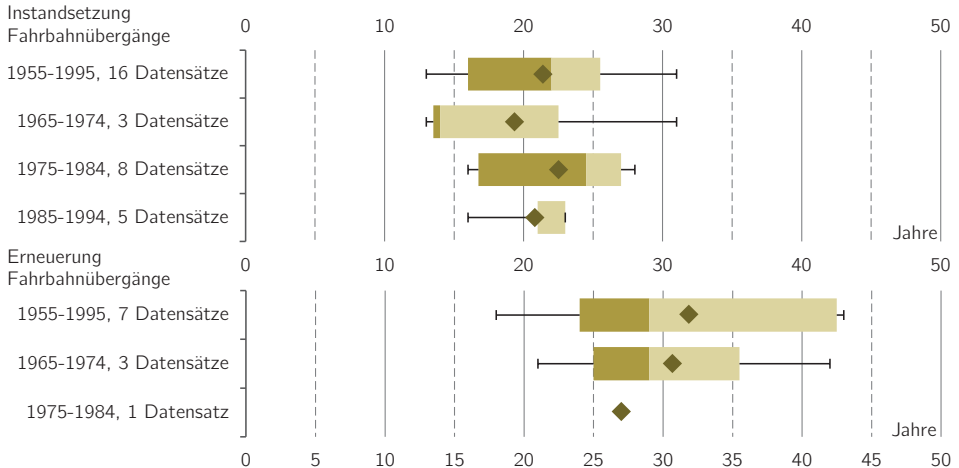


Abbildung C.6: Erhaltungszeiträume für Fahrbahnübergänge von Mehrfeld-Hohlkastenbrücken, Datensätze von Instandsetzungsmaßnahmen (oben) und Erneuerungsmaßnahmen (unten), Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

### Deutung:

Die Auswertungen zu Fahrbahnübergangskonstruktionen von Mehrfeld-Hohlkastenbrücken liefern trotz begrenzter Datensatzanzahl ein vergleichsweise einheitliches Bild. Für die Auswertung von Instandsetzungsmaßnahmen ergeben sich für alle Baujahresklassen Mediane von 14 bis 25 Jahren und Mittelwerte zwischen 20 und 22 Jahren.

Bei Auswertung von Erneuerungsmaßnahmen ergeben sich erwartungsgemäß deutlich höhere Erhaltungszeiträume. Allerdings muss hier die begrenzte Grundgesamtheit von nur 7 Datensätzen beachtet werden. Im Vergleich mit der Zweifeldbrücke liegen die Ergebnisse in derselben Größenordnung.

### C.2.1 Fahrbahn und Abdichtung

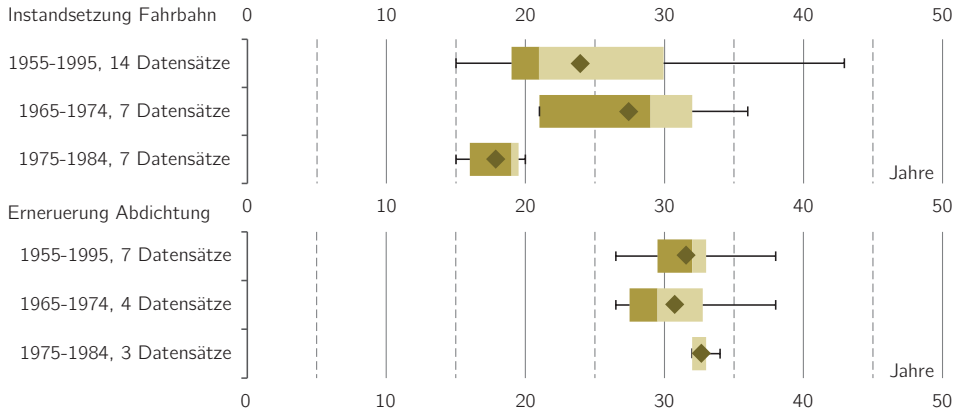


Abbildung C.7: Erhaltungszeiträume für Instandhaltungsmaßnahmen von Fahrbahnen (oben) und Erneuerungsmaßnahmen von Abdichtungen (unten) für Mehrfeld-Hohlkastenbrücken, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Die Daten für die Maßnahmen an Fahrbahnen und Abdichtungen ergeben ein schlüssiges Bild. Für Instandsetzungsmaßnahmen sind wiederum zwei Zyklen bei der Analyse der Baujahresklassen erkennbar, so dass sich hier ein Erhaltungszeitraum von 15 bis 17 Jahren für den Fahrbahnbelag ergibt.

Die Auswertung von Abdichtungs-Erneuerungsmaßnahmen liefert deutlich längere Erhaltungszeiträume, die bei ca. 30 Jahren liegen. Es ist hierbei allerdings keine Abhängigkeit von der Baujahresklasse zu erkennen, was aufgrund der sehr langen theoretischen Nutzungsdauern von Brückenabdichtungen unterhalb von Fahrbahnbelägen auch zu erwarten ist. Unter Beachtung der sehr kleinen Grundgesamtheit muss festgestellt werden, dass nur von einer geringen Signifikanz der Ergebnisse ausgegangen werden kann.

### C.3 Ergebnisse Mehrfeldbrücken

#### C.3.1 Fahrbahnübergangskonstruktionen

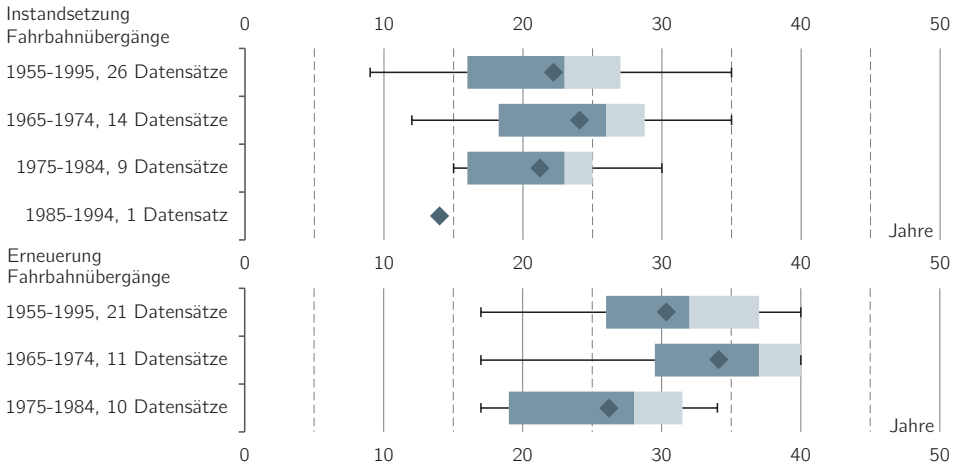


Abbildung C.8: Erhaltungszeiträume für Fahrbahnübergänge von Mehrfeldbrücken mit  $L > 100$  m, Datensätze von Instandsetzungsmaßnahmen (oben) und Erneuerungsmaßnahmen (unten), Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

**Deutung:**

Für Mehrfeldbrücken mit einer Länge von mehr als 100 m sind die Auswertungen für Instandsetzungs- und Erneuerungsmaßnahmen getrennt dargestellt. Für Instandsetzungen liegen alle oberen Quartile der baujahresabhängigen Erhaltungszeiträume deutlich unterhalb von 30 Jahren und die unteren Quartile deutlich oberhalb von 15 Jahren. Allerdings ist aus den Datensätzen nicht ersichtlich, um welche Art von Instandsetzungsmaßnahme es sich handelt, mögliche Kommentierungen beziehen sich vorwiegend auf die Art der Kostenaufteilung auf verschiedene Maßnahmen.

Die Erneuerungsmaßnahmen für Fahrbahnübergänge weisen deutlich längere Erhaltungszeiträume auf. Es ist eine Abhängigkeit von der Baujahresklasse zu erkennen, allerdings ergeben sich sehr große Bandbreiten zwischen den Quartilen. Auch hier muss noch einmal darauf hingewiesen werden, dass bei einer Anzahl von 13 Bauwerken keine Berechnung der Erhaltungszeiträume für in der Datenbank ausgewiesene Erneuerungsmaßnahmen erfolgen konnte, da Angaben zum Maßnahmenausführungsjahr oder dem Bauwerksbaujahr



fehlten. Bei insgesamt 93 in der Datenbank SIB-Bauwerke enthaltenen Teilbauwerken passend zur Abfragespezifikation (siehe auch Tabelle 4.3) müssten 59 Brücken existieren, bei denen bisher keine Erneuerungsmaßnahmen stattgefunden haben. Auch hier kann es sein, dass eine Zuordnung von Erneuerungsmaßnahmen zu der Kategorie der Instandsetzungen erfolgte und damit die Anzahl von tatsächlich durchgeführten Erneuerungsmaßnahmen größer ist. Wenn Erneuerungsmaßnahmen aufgrund von langen Nutzungsdauern bisher nicht durchgeführt wurden, muss davon ausgegangen werden, dass sich mit zunehmender Laufzeit der Datenbank SIB-Bauwerke die Erhaltungszeiträume verlängern.

### C.3.2 Kappen

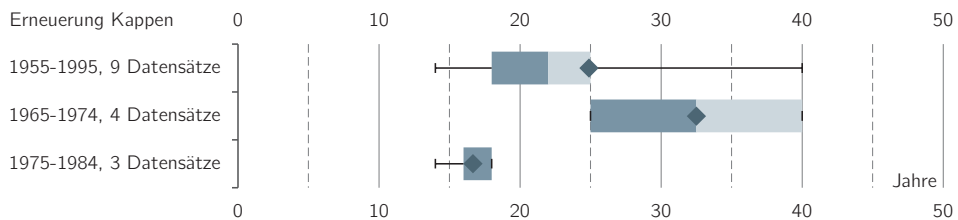


Abbildung C.9: Erhaltungszeiträume für Kappen von Mehrfeldbrücken mit  $L > 100$  m, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Die sehr geringe Grundgesamtheit zu der Bauteilgruppe der Kappen für Mehrfeldbrücken von mehr als 100 m Länge macht eine Auswertung nur bedingt möglich. Die Ergebnisse zeigen große Bandbreiten mit verzerrten Darstellungen der Boxplots, die auf die sehr geringe Anzahl an Datensätze zurückzuführen ist.

### C.3.3 Abdichtung

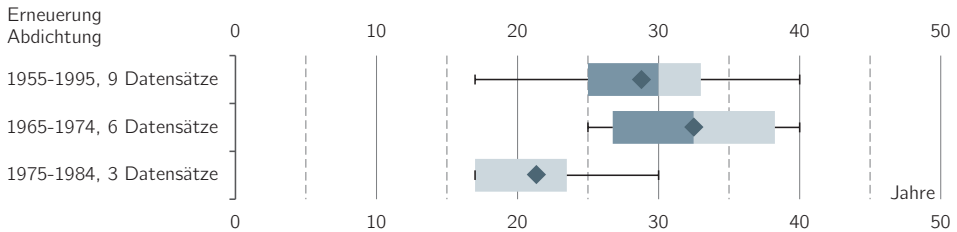


Abbildung C.10: Erhaltungszeiträume für Abdichtungen von Mehrfeldbrücken mit  $L > 100$  m, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Die Erhaltungszeiträume für Abdichtungen von Mehrfeldbrücken mit einer Länge von mehr als 100 m zeigen eine zeitliche Staffelung, die genauso wie bei den Zweifeld-Balkenbrücken nur schwer erklärbar ist, da sich die Erhaltungszeiträume für die Abdichtungserneuerung auf einem durchgängig hohen Niveau befinden sollten. Eine Erklärung könnte die Zuordnung von Datensätzen zu Fahrbahn-Instandsetzungsmaßnahmen zu der Erneuerung von Abdichtungen sein.

Insgesamt muss beachtet werden, dass die sehr geringe Grundgesamtheit zur einer geringen Signifikanz der Ergebnisse führt. Die lediglich drei Datensätze der Baujahresklasse von 1975-1984 könnten vorgezogene Maßnahmen darstellen, vor allem da für Baujahresklassen ab 1985 keine Datensätze existieren.

### C.3.4 Brüstungen und Geländer

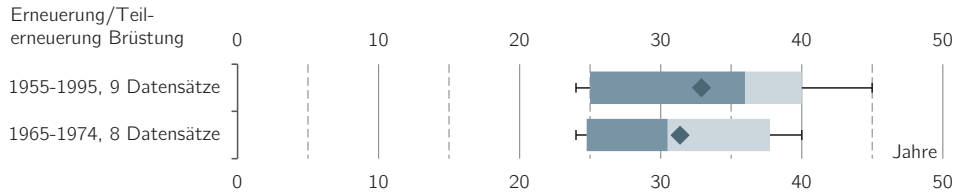


Abbildung C.11: Erhaltungszeiträume für Brüstungen von Mehrfeldbrücken mit  $L > 100$  m, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

#### Deutung:

Fast alle Datensätze für die Erneuerung bzw. Teilerneuerung von Brüstungen für Mehrfeldbrücken mit einer Länge von mehr als 100 m fallen in die Baujahresklasse von 1965 bis 1974. Die Mediane und Mittelwerte liegen dabei alle über dem Erhaltungszeitraumwert von 30 Jahren. Ähnliche Ergebnisse liefern auch die Auswertungen zu dieser Bauteilgruppe bei den Zweifeld-Balkenbrücken.

Die geringe Grundgesamtheit lässt darauf schließen, dass ein Großteil der eingebauten Brüstungen bisher nicht erneuert wurden. Bei einer Analyse der Bauwerke, bei denen zeitgleich eine Kappenerneuerung und Brüstungserneuerung stattgefunden hat, stellt sich heraus, dass eine gleichzeitige Ausführung in ca. 50 % der Fälle gegeben ist.

## C.4 Ergebnisse Verformungslager

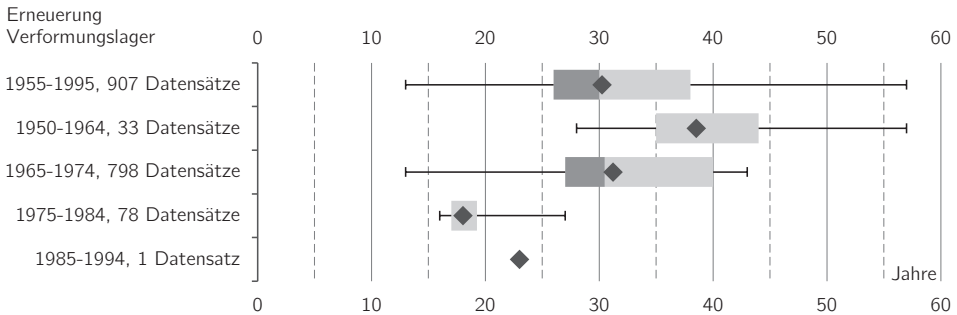


Abbildung C.12: Erhaltungszeiträume für Verformungslager von Brücken mit  $L > 100$  m, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

### Deutung:

Insgesamt stehen für die Auswertung 907 Lager-Datensätze zur Verfügung, wobei sich diese auf insgesamt 59 Brücken verteilen, so dass im Durchschnitt ca. 15 Lager pro Bauwerk ausgewechselt wurden. Da in den meisten Fällen eine zeitgleiche Erneuerung aller Lager eines Bauwerks stattfand, kann anhand der Daten nicht abgeleitet werden, ob für einen Teil der Lager im Rahmen einer Maßnahmenbündelung ein präventiver Austausch durchgeführt wurde oder ein Austausch bei allen Lagern durchgeführt werden musste.

Ein Ziel der Abfrage für Bauwerke mit einer Länge von mehr als 100 m ist es herauszufinden, ob Einzelaustauschmaßnahmen bei Lagern üblich sind. Die Ergebnisse zeigen, dass dies nicht der Fall ist. Die zeitgleiche Lagererneuerung führt zu einer Vielzahl an identischen Erhaltungszeiträumen, die sich in einem verzerrten Boxplot ausdrücken können. So fallen für die Baujahresklasse von 1950-1964 der Median und das untere Quartil zusammen, da ein Viertel der Datensätze denselben Erhaltungszeitraum von 35 Jahren besitzt.

Insgesamt ergeben sich Medianwerte und Mittelwerte, die für die älteren Baujahresklassen bei über 30 Jahren liegen. Auffällig sind die vergleichsweise hohen maximalen Erhaltungszeiträume. Alle Werte liegen deutlich über denen für die Zweifeld-Balkenbrücke, die allerdings aufgrund ihrer geringen Grundgesamtheit nur eine begrenzte Signifikanz aufweisen.

## C.5 Ergebnisse Stahllamellen-Fahrbahnübergänge

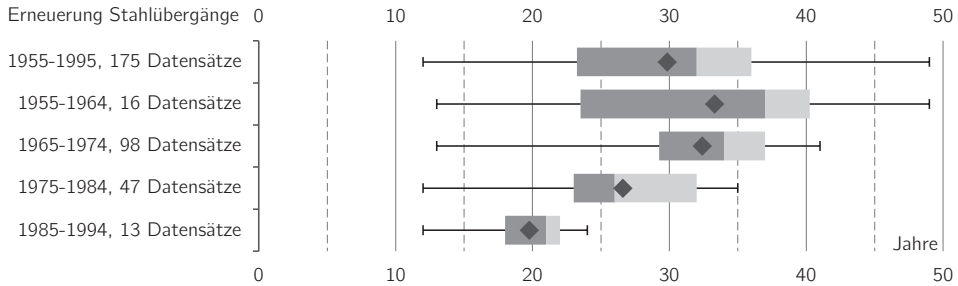


Abbildung C.13: Erhaltungszeiträume für Stahllamellen-Fahrbahnübergänge mit 1-3 Lamellen, Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

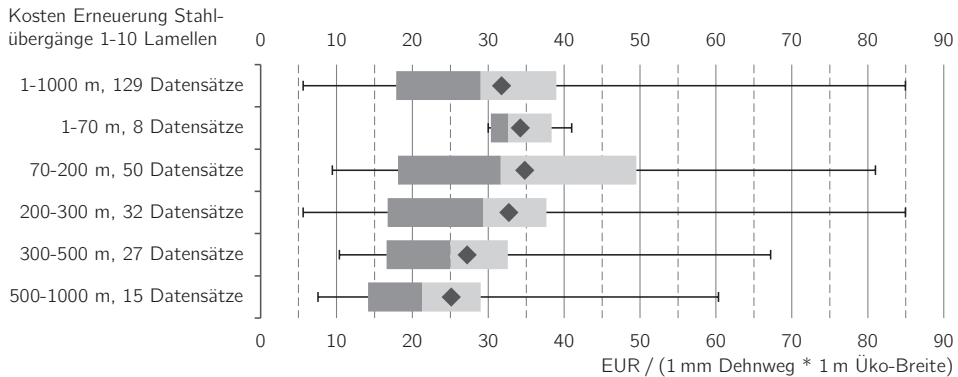


Abbildung C.14: Kosten für Stahllamellen-Fahrbahnübergänge mit 1-10 Lamellen bezogen auf Millimeter Dehnweg und Meter Fahrbahnübergangslänge, Unterteilung in Brückenlängenbereiche

### Deutung:

Die Ergebnisse für die Erneuerung von Fahrbahnübergängen mit ein bis drei Lamellen basieren auf einer im Vergleich zu den Ergebnissen der Zweifeldbrücke deutlich größeren Grundgesamtheit. Der Medianwert für den Gesamtzeitraum ist dabei für beide Abfragen mit einem Erhaltungszeitraum von 32 bzw. 32,5 Jahren fast identisch.

Für Fahrbahnübergänge wird zusätzlich eine Kostenauswertung durchgeführt, wobei hier auch Fahrbahnübergänge mit mehr als drei Lamellen einbezogen werden. Wie bei allen Kostenanalysen aus der Datenbank SIB-Bauwerke ergeben sich auch hier große Bandbreiten, es ist aber ein deutlicher Trend der Abnahme der bezogenen Kosten bei längeren Brückenbauwerken zu erkennen.

## C.6 Ergebnisse Entwässerungen und Schutzeinrichtungen

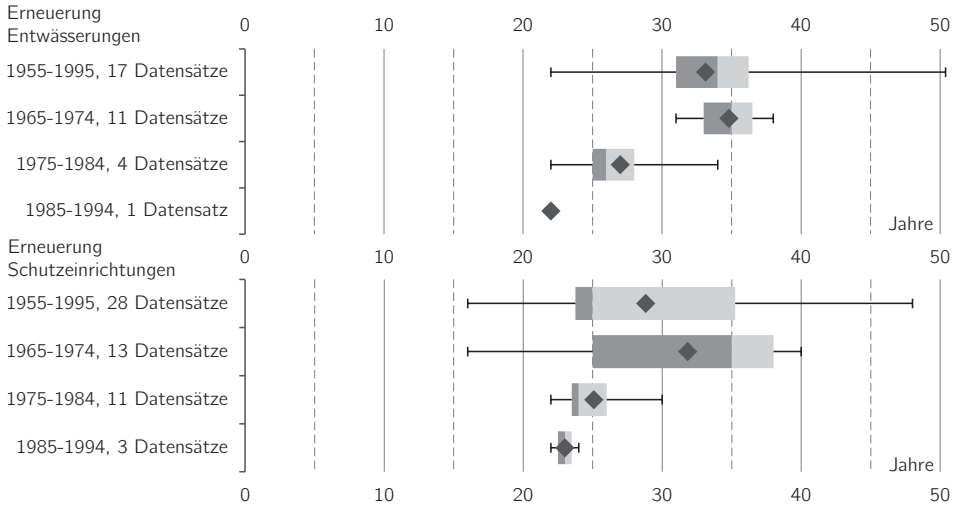


Abbildung C.15: Erhaltungszeiträume für Entwässerungen und Schutzeinrichtungen auf Basis von Datensätzen aller bauwerksspezifischen Abfragen, jeweils Darstellung des Gesamtergebnisses und der Ergebnisse bei Gruppierung nach Brückenbaujahr

### Deutung:

Für die Auswertung der in der Bauteilgruppe „Ausstattung“ zusammengefassten Komponenten werden jeweils Ergebnisse aus den drei brückenspezifischen Abfragen kombiniert, um die Grundgesamtheit zu erhöhen und eine Auswertung zu ermöglichen. Es existieren zwar brückenspezifische Unterschiede bei der Ausführung von Entwässerungen und Schutzeinrichtungen, die geringen Ergebnisbandbreiten zeigen allerdings, dass diese im Rahmen einer Auswertung der Erhaltungszeiträume vernachlässigbar sind.

Der Median aller Ergebnisse liegt bis auf die jüngste Baujahresklasse zwischen 25 und 35 Jahren. Die im Vergleich zu der Anzahl der abgefragten Brücken geringe Datensatzanzahl lässt darauf schließen, dass bei einem Großteil der Bauwerke die Ausstattungskomponenten bisher nicht erneuert wurden bzw. die Datensätze nicht in die Datenbank eingepflegt worden sind.

## **Anhang D: Definition von Bauzeiten und Verkehrsführungen**

### **Vorbemerkungen**

Die Festlegung der Bauzeiten und Verkehrsführungen für die Herstellungsphase der Referenzbrücken baut größtenteils auf Soll-Zeiten von Bauzeitenplänen auf. Diese Angaben werden von Angaben auf Basis des Bauzeitenkatalogs (BZK: 2009) ergänzt.

Die Bauzeiten und Verkehrsführungen in der Nutzungsphase bauen fast vollständig auf dem Bauzeitenkatalog auf. Da die dortigen Angaben sich größtenteils auf Bauwerke mit oben liegender Autobahn beziehen, werden diese Angaben auf Sachverhalte mit unten liegender Autobahn übertragen. Des Weiteren sind im BZK (2009) nur Angaben bis zu einer Brückenlänge von 70 m vorhanden. Für die Referenzbrücken B (Gesamtlänge ca. 150 m) und C (Gesamtlänge ca. 450 m) werden die tabellierten Werte auf Grundlage der jeweiligen Brückenlänge angepasst.

Alle in den nachfolgenden Tabellen aufgeführten Werte stellen untere Grenzwerte dar. Nach dem BZK (2009) werden auf diese Grundwerte mit Erhöhungsfaktoren für Tageslichtverfügbarkeit und Schlechtwetter multipliziert, die als monatsabhängige Prozentsätze ausgewiesen sind. Diese Faktoren werden in den im Folgenden aufgeführten Tabellen nicht berücksichtigt, finden aber in die in Abschnitt 4.3.3 definierte Erhöhungsfunktion zur Bestimmung der Bauzeitenunsicherheiten einer Repräsentativbauwoche Eingang.

## D.1 A-Referenzbauwerke: 6-streifige Autobahn unten liegend

### D.1.1 Herstellungsphase A1 (Integralbrücke)

Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Wochen-äquivalent [Wochen]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung AB	Datengrundlage
Verkehrsführung einrichten	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Erdarbeiten, Spundwände	20	4	5	3+3	Referenzbrücken
Bohrpfähle	10	2		3+3	Referenzbrücken
Fundamente	15	3		3+3	Referenzbrücken
Widerlager	22	5		3+3	Referenzbrücken
Überbau	11	2	2	3+3	Referenzbrücken
Hinterfüllung	11	2	2	3+3	Referenzbrücken
Abdichtung Fahrbahn	5	1		3+3	Bauzeitenkatalog
2 Kappen inkl. Abdichtung	15	3	3	3+3	Bauzeitenkatalog
Fahrbahnbelag, Ausstattung	11	2	3	3+3	Referenzbrücken
Abbruch Bestandsbauwerk	16	3		3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung rückbauen	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Gesamtwochen Herstellung		29	22		

### D.1.2 Herstellungsphase A2-V (Zweifeld-Verbundbrücke)

Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Wochen-äquivalent [Wochen]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Datengrundlage
Verkehrsführung einrichten	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Erdarbeiten, Spundwände	20	4	6	3+3	Referenzbrücken
Bohrpfähle	10	2		3+3	Referenzbrücken
Fundamente	15	3		3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung umbauen	1,5	0		0	2+2/3+3
Widerlager	18	4	4	2+2/3+3	Referenzbrücken
Pfeiler	8	2	2	2+2/3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung umbauen	1,5	0	0	3+3	Bauzeitenkatalog
Überbau	31	6	6	3+3	Referenzbrücken
Hinterfüllung	11	2	2	3+3	Referenzbrücken
Abdichtung Fahrbahn	5	1		3+3	Bauzeitenkatalog
2 Kappen inkl. Abdichtung	15	3	3	3+3	Bauzeitenkatalog
Fahrbahnbelag, Ausstattung	11	2	3	3+3	Referenzbrücken
Abbruch Bestandsbauwerk	16	3		3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung rückbauen	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Gesamtwochen		34	28		



### D.1.3 Herstellungsphase A2-B (Zweifeld-Stahlbetonbrücke)

Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Wochen- äquivalent [Wochen]	Zeit Parallel- aktivitäten [Wochen]	Verkehrs- führung Autobahn	Datengrundlage
Verkehrsführung einrichten	3	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Erdarbeiten, Spundwände	20	4	6	3+3	Referenzbrücken
Bohrpfähle	10	2		3+3	Referenzbrücken
Fundamente	15	3		3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung umbauen	1,5	0		0	2+2
Widerlager	18	4	4	2+2	Referenzbrücken
Pfeiler	8	2	2	2+2	Referenzbrücken
Verkehrsführung umbauen <sup>1</sup>	6	1	1	4+0	Bauzeitenkatalog
Lehrgerüst und Überbau Feld 1	35	7	7	4+0	Wall&Schneider 2012
Verkehrsführung umbauen <sup>1</sup>	4	1	1	4+0	Bauzeitenkatalog
Lehrgerüst und Überbau Feld 2	35	7	7	4+0	Wall&Schneider 2012
Verkehrsführung umbauen <sup>1</sup>	4	1	1	3+3	Bauzeitenkatalog
Hinterfüllung	11	2	2	3+3	Referenzbrücken
Abdichtung Fahrbahn	5	1		3+3	Bauzeitenkatalog
2 Kappen inkl. Abdichtung	15	3	3	3+3	Bauzeitenkatalog
Fahrbahnbelag, Ausstattung	11	2	3	3+3	Referenzbrücken
Abbruch Bestandsbauwerk	16	3		3+3	Referenzbrücken
Verkehrsführung rückbauen	3	1		1	3+3
Gesamtwochen		45	39		

<sup>1</sup> inkl. Umbau der Fahrtrichtungstrennung

**D.1.4 Einzelmaßnahmen Instandsetzung und Erneuerung A-Referenzbauwerke**

Bauteilgruppe	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Verkehrsführung Überführung	Verkehrsführung Autobahn
Verkehrsführung	Bau Mittelstreifenüberfahrten	3	-	4s+2
	Verkehrsführung einrichten	3	1+0	3+3
	Verkehrsführung umbauen	1,5	1+0	2+2
	Verkehrsführung umbauen (mit FRT)	4	-	4+0
	Verkehrsführung rückbauen	3	1+0	3+3
Fahrbahnübergänge (pro Stück)	Dichtprofil Fahrbahnübergang	1	1+0	3n+3n
	Austausch Fahrbahnübergang (1)	4	Sperrung	3n+3n
	<i>Ausbau</i>	1	Sperrung	3n+3n
	<i>Einbau</i>	2	Sperrung	3n+3n
	<i>Aushärten</i>	1	Sperrung	3n+3n
	Austausch Fahrbahnübergang (2)	8	1+0	3n+3n
	<i>Ausbau</i>	2	1+0	3n+3n
	<i>Einbau</i>	4	1+0	3n+3n
	<i>Aushärten</i>	2	1+0	3n+3n
	Lager	Ausbau und Einbau Lager (pro Stück)	0,5	1n+1n
Kappen, Schutz- einrichtungen, Geländer (pro Überbau)	Austausch Kappen gesamt	25,75	1+0	3n+3n
	<i>Schutzgerüst einbauen</i>	2	1+0	3n+3n
	<i>Schutzeinrichtung ausbauen</i>	0,75	1+0	3n+3n
	<i>Geländer u. Kappen ausbauen</i>	4	1+0	3n+3n
	<i>Abdichtung unter Kappen einbauen</i>	3	1+0	3n+3n
	<i>Kappen einbauen</i>	12	1+0	3n+3n
	<i>Schutzeinrichtung einbauen</i>	3	1+0	3n+3n
<i>Geländer einbauen</i>	1	1+0	3n+3n	
Korrosions- schutz	Ausbesserung gesamt (5%)	2	1n+1n	3+3
	Teilerneuerung gesamt (12,5 %)	5	1n+1n	3+3
	Vollerneuerung gesamt (100%)	15	1n+1n	5s+1
Betoninstand- setzung	Mittelpfeiler gesamt	8	1n+1n	3s+3s
	Widerlager gesamt	12	1n+1n	3+3
	Unterseite Überbau gesamt	14	1n+1n	5s+1

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benützung des Seitenstreifens

\* Tagesbaustelle

## D.1 A-Referenzbauwerke: 6-streifige Autobahn unten liegend

Fortsetzung Tabelle Einzelmaßnahmen Instandsetzung und Erneuerung A-Referenzbauwerke

Bauteilgruppe	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Verkehrsführung Überführung	Verkehrsführung Autobahn
Fahrbahn	Austausch Decksicht gesamt	2	1+0	3n+3n
	<i>Ausbau Belag</i>	1	1+0	3n+3n
	<i>Deckschicht herstellen</i>	1	1+0	3n+3n
	Austausch Deckschicht/Abdichtung (1)	12	1+0	3n+3n
	<i>Ausbau Belag u. Abdichtung</i>	2	1+0	3n+3n
	<i>Betoninstandsetzung nach 33 Jahren</i>	4	1+0	3n+3n
	<i>Abdichtung Fahrbahnbereich einbauen</i>	5	1+0	3n+3n
	<i>Deckschicht herstellen</i>	1	1+0	3n+3n
	Austausch Deckschicht/Abdichtung (2)	16	1+0	3n+3n
	<i>Ausbau Belag u. Abdichtung</i>	2	1+0	3n+3n
	<i>Betoninstandsetzung nach 66 Jahren</i>	8	1+0	3n+3n
	<i>Abdichtung Fahrbahnbereich einbauen</i>	5	1+0	3n+3n
	<i>Deckschicht herstellen</i>	1	1+0	3n+3n
	Ausstattung	Entwässerung gesamt	4,5	1+0
<i>Straßenabläufe entfernen</i>		0,5	1+0	3n+3n
<i>Entwässerung einbauen (Straße)</i>		2	1+0	3n+3n
<i>Entwässerung einbauen (Randstreifen)</i>		2	1+0	3n+3n
Überbau	Erneuerung Überbau Integralbrücke	62	Sperrung	3+3
	<i>Rückbau</i>	10	Sperrung	3+3#
	<i>Anarbeitung Widerlager</i>	10	Sperrung	3+3
	<i>Erstellung Überbau</i>	42	Sperrung	3+3
	Erneuerung Überbau Verbundbrücke	70	Sperrung	3+3
	<i>Rückbau</i>	8	Sperrung	3+3#
	<i>Erstellung Überbau</i>	62	Sperrung	3+3
	Erneuerung Überbau Stahlbeton	123	Sperrung	3+3
<i>Rückbau</i>	14	Sperrung	3+3#	
<i>Erstellung Überbau mit Ortbeton</i>	109	Sperrung	3+3	

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

# zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

**D.1.5 Lebenszyklus A1 (Integralbrücke), Präventivstrategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n
9	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
17	Korrosionsschutz Ausbesserung	2	0,5	3+3	1n+1n
25	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
33	Verkehrsführung	2	9	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	26			
	Austausch Schutzeinrichtungen				
	Austausch Deckschicht/Abdichtung				
	Austausch Entwässerung				
	Verkehrsführung		10	5	5s+1
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	5			
	Betoninstandsetzung Überbau	10			
	Betoninstandsetzung Widerlager	12	3		
41	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
	Korrosionsschutz Ausbesserung	2	0,5	3+3	1n+1n
50	Verkehrsführung	10	5,0	5s+1	1n+1n
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15			
59	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
67	Verkehrsführung	2	10	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	26			
	Austausch Schutzeinrichtungen				
	Austausch Abdichtung				
	Austausch Entwässerung				
	Verkehrsführung		10	4	5s+1
	Betoninstandsetzung Überbau	10			
	Korrosionsschutz Ausbesserung	2			
	Betoninstandsetzung Widerlager	12	3		
75	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
83	Verkehrsführung	6	2	3+3	1n+1n
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	5			
91	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
	Korrosionsschutz Ausbesserung	2	0,5	3+3	1n+1n
100	Rückbau	10	2	3+3#	0+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens  
 # zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

### D.1.6 Lebenszyklus A1 (Integralbrücke), Zustandsbestimmte Strategie

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n
17	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
33	Verkehrsführung	2	9	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	26			
	Austausch Schutzzeineinrichtungen				
	Austausch Deckschicht/Abdichtung				
	Austausch Entwässerung	4,5			
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15			
	Verkehrsführung	10	5	5s+1	1n+1n
50	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
67	Verkehrsführung	2	10	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	26			
	Austausch Schutzzeineinrichtungen				
	Austausch Deckschicht/Abdichtung				
	Austausch Entwässerung	4,5			
	Verkehrsführung	10			
	Betoninstandsetzung Überbau	10	7	5s+1	1n+1n
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15			
	Betoninstandsetzung Widerlager	12	3	3+3	1n+1n
83	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
100	Rückbau	10	2	3+3#	0+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

# zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

### D.1.7 Lebenszyklus A1 (Integralbrücke), Strategie der gezielten Alterung

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n
17	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
33	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
50	Verkehrsführung	10	14	3+3#	Sperrung
	Erneuerung Überbau Integralbrücke	62			
67	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
83	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
100	Rückbau	10	2	3+3#	0+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, # zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

**D.1.8 Lebenszyklus A2-V (Zweifeld-Verbundbrücke), Präventivstrategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung	
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n	
	Herstellung	-	6	2+2	1n+1n	
9	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0	
17	Korrosionsschutz Ausbesserung	2	0,5	3+3	1n+1n	
	Dichtprofil Lamellenübergang	2	0,5	3n+3n	1+1	
25	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0	
33	Verkehrsführung	2	10	3n+3n	1+0	
	Erneuerung Kappen	26				
	Austausch Schutzeinrichtungen					
	Austausch Lamellenübergang					8
	Austausch Deckschicht/Abdichtung					12
	Austausch Entwässerung	4,5				
	Verkehrsführung	10	5	5s+1	1n+1n	
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	5				
	Betoninstandsetzung Überbau	10				
	Austausch Elastomerlager	3				
Betoninstandsetzung Widerlager	12	3	3+3*	1n+1n		
41	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0	
	Korrosionsschutz Ausbesserung	2	0,5	3+3	1n+1n	
50	Verkehrsführung	10	5,0	5s+1	1n+1n	
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15				
	Dichtprofil Lamellenübergang	2				0,5
59	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0	
67	Verkehrsführung	2	11	3n+3n	1+0	
	Erneuerung Kappen	26				
	Austausch Schutzeinrichtungen					
	Austausch Lamellenübergang					8
	Austausch Deckschicht/Abdichtung					16
	Austausch Entwässerung	4,5				
	Verkehrsführung	10	4	5s+1	1n+1n	
	Betoninstandsetzung Überbau	10				
	Korrosionsschutz Ausbesserung	2				
	Austausch Elastomerlager	3				
Betoninstandsetzung Widerlager	12	3	3+3*	1n+1n		
75	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0	
83	Verkehrsführung	6	2	3+3	1n+1n	
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	5				
	Dichtprofil Lamellenübergang	2				0,5
91	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0	
	Korrosionsschutz Ausbesserung	2	0,5	3+3	1n+1n	
100	Rückbau	10	2	3+3#	0+0	

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

# zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

**D.1.9 Lebenszyklus A2-V (Zweifeld-Verbundbrücke),  
Zustandsbestimmte Strategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel- aktivitäten [Wochen]	Verkehrs- führung Autobahn	Verkehrs- führung Überführung			
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n			
	Herstellung	-	6	2+2	1n+1n			
17	Dichtprofil Lamellenübergang	2	1	3n+3n	1+0			
	Deckschicht Fahrbahn	2						
33	Verkehrsführung	2	10	3n+3n	1+0			
	Erneuerung Kappen	26						
	Austausch Schutzeinrichtungen							
	Austausch Lamellenübergang							
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	12						
	Austausch Entwässerung	4,5						
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15						
	Verkehrsführung	10				5	5s+1	1n+1n
	Austausch Elastomerlager	3				1	3n+3*	1n+1n
	50	Dichtprofil Lamellenübergang				2	1	3n+3n
Deckschicht Fahrbahn		2						
67	Verkehrsführung	2	11	3n+3n	1+0			
	Erneuerung Kappen	26						
	Austausch Schutzeinrichtungen							
	Austausch Lamellenübergang							
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	16						
	Austausch Entwässerung	4,5						
	Verkehrsführung	10				8	5s+1	1n+1n
	Betoninstandsetzung Überbau	10						
	Betoninstandsetzung Mittelpfeiler	8						
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	15				3	3+3*	1n+1n
Betoninstandsetzung Widerlager	12							
Austausch Elastomerlager	3							
83	Dichtprofil Lamellenübergang	2	1	3n+3n	1+0			
	Deckschicht Fahrbahn	2						
100	Rückbau	8	2	3+3#	0+0			

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle, # zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

### D.1.10 Lebenszyklus A2-V (Zweifeld-Verbundbrücke), Strategie der gezielten Alterung

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n
	Herstellung	-	6	2+2	1n+1n
17	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
33	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
50	Verkehrsführung	10	16	3+3#	Sperrung
	Erneuerung Überbau Verbundbrücke	70			
67	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
83	Deckschicht Fahrbahn	2	0,5	3n+3n	1+0
100	Rückbau	10	2	3+3#	0+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, # zusätzliche Sperrung für ein Wochenende



### D.1.11 Lebenszyklus A2-V (Zweifeld-Verbundbrücke), WT-Stahl, Zustandsbestimmte Strategie

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung
0	Herstellung	-	22	3+3	1n+1n
	Herstellung	-	6	2+2	1n+1n
17	Dichtprofil Lamellenübergang	2	}	3n+3n	1+0
	Deckschicht Fahrbahn	2			
33	Verkehrsführung	2	}	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	}			
	Austausch Schutzeinrichtungen				
	Austausch Lamellenübergang	8			
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	12			
	Austausch Entwässerung	4,5			
	Austausch Elastomerlager	3			
50	Dichtprofil Lamellenübergang	2	}	3n+3n	1+0
	Deckschicht Fahrbahn	2			
67	Verkehrsführung	2	}	3n+3n	1+0
	Erneuerung Kappen	}			
	Austausch Schutzeinrichtungen				
	Austausch Lamellenübergang	8			
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	16			
	Austausch Entwässerung	4,5			
	Verkehrsführung	10			
	Betoninstandsetzung Überbau	10			
	Betoninstandsetzung Mittelpfeiler	8			
	Betoninstandsetzung Widerlager	12	}	3+3*	1n+1n
	Austausch Elastomerlager	3			
83	Dichtprofil Lamellenübergang	2	}	3n+3n	1+0
	Deckschicht Fahrbahn	2			
100	Rückbau	8	2	3+3#	0+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle, # zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

**D.1.12 Lebenszyklus A2-B (Zweifeld-Verbundbrücke),  
Zustandsbestimmte Strategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallel-aktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Verkehrsführung Überführung			
0	Herstellung	-	17	3+3	1n+1n			
	Herstellung	-	6	2+2	1n+1n			
	Herstellung	-	16	4+0	1n+1n			
17	Dichtprofil Lamellenübergang	2	1	3n+3n	1+0			
	Deckschicht Fahrbahn	2						
33	Verkehrsführung	2	10	3n+3n	1+0			
	Erneuerung Kappen	26						
	Austausch Schutzeinrichtungen							
	Austausch Lamellenübergang							
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	12						
	Austausch Entwässerung	4,5						
	Austausch Elastomerlager	3				1	3n+3*	1n+1n
50	Dichtprofil Lamellenübergang	2	1	3n+3n	1+0			
	Deckschicht Fahrbahn	2						
67	Verkehrsführung	2	11	3n+3n	1+0			
	Erneuerung Kappen	26						
	Austausch Schutzeinrichtungen							
	Austausch Lamellenübergang							
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	16						
	Austausch Entwässerung	4,5						
	Verkehrsführung	10				10	5s+1	1n+1n
	Betoninstandsetzung Überbau	34						
	Betoninstandsetzung Mittelpfeiler	8						
	Betoninstandsetzung Widerlager	12						
Austausch Elastomerlager	3	3	3+3*	1n+1n				
83	Dichtprofil Lamellenübergang	2	1	3n+3n	1+0			
	Deckschicht Fahrbahn	2						
100	Rückbau	14	3	3+3#	0+0			

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle, # zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

## D.2 B-Referenzbauwerk: 4-streifige Autobahn oben liegend

### D.2.1 Herstellungsphase B (Dreifeld Verbund-Hohlkastenbrücke)

<u>Einzelmaßnahme</u>	<u>Ansatz [Tage]</u>	<u>Wochen- äquivalent [Wochen]</u>	<u>Zeit Parallel- aktivitäten [Wochen]</u>	<u>Verkehrs- führung Autobahn</u>	<u>Datengrundlage</u>
Verkehrsführung einrichten	6	1	1	4s+0	Bauzeitenkatalog
Abbruch Bestandsbauwerk	30	6	6	4s+0	geschätzt
Erdarbeiten, Spundwände	45	9	11	4s+0	Referenzbrücken
Gründung	12	3		4s+0	Referenzbrücken
Fundamente	14	3	13	4s+0	Referenzbrücken
Pfeiler	60	12		4s+0	Referenzbrücken
Widerlager	39	8		4s+0	Referenzbrücken
Überbau Stahlbau	50	10	15	4s+0	Referenzbrücken
Montage Schalwagen	25	5		4s+0	Referenzbrücken
Überbau Betonbau	73	13		4s+0	Bauzeitenkatalog
2 Kappen inkl. Abdichtung	30	6	6	4s+0	Bauzeitenkatalog
Fahrbahnbelag, Ausstattung	11	2	2	4s+0	Referenzbrücken
Verkehrsführung rückbauen	6	1	1	4s+0	Bauzeitenkatalog
Gesamtwochen Herstellung		79	55		

## D.2.2 Einzelmaßnahmen Instandsetzung und Erneuerung B-Referenzbauwerk

Bauteilgruppe	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Verkehrsführung Autobahn
Verkehrsführung	Bau Mittelstreifenüberfahrten	3	3s+1/4s+0
	Verkehrsführung einrichten	3	3s+1/4s+0
	Verkehrsführung umbauen	1,5	2+2
	Verkehrsführung umbauen (mit FRT)	4	3s+1/4s+0
	Verkehrsführung rückbauen	3	3s+1/4s+0
Fahrbahnübergänge (pro Stück)	Dichtprofil Fahrbahnübergang	1	2n+1*
	Austausch Fahrbahnübergang gesamt (1)	6	4s+0
	<i>Ausbau</i>	1	4s+0
	<i>Einbau</i>	4	4s+0
	<i>Aushärten</i>	1	4s+0
	Austausch Fahrbahnübergang gesamt (2)	13	3s+1
	<i>Ausbau</i>	2	3s+1
	<i>Einbau</i>	9	3s+1
	<i>Aushärten</i>	2	3s+1
Lager (pro Stück)	Ausbau und Einbau Lager	0,5	2n+2 Tag*
Kappen,	Austausch Kappen gesamt	39	4s+0
Schutzeinrichtung,	<i>Schutzgerüst einbauen</i>	4	4s+0
Geländer (pro Überbau)	<i>Schutzeinrichtung ausbauen</i>	2	4s+0
	<i>Geländer u. Kappen ausbauen</i>	6	4s+0
	<i>Abdichtung unter Kappen einbauen</i>	5	4s+0
	<i>Kappen einbauen</i>	16	4s+0
	<i>Schutzeinrichtung einbauen</i>	4	4s+0
	<i>Geländer einbauen</i>	2	4s+0
Korrosionsschutz (pro Überbau)	Ausbesserung gesamt (5%)	4	2n+2
	Teilerneuerung gesamt (12,5 %)	10	2n+2
	Vollerneuerung gesamt (100%)	25	2n+2
Betoninstandsetzung	Widerlager gesamt	15	2n+2
	Unterseite Überbau gesamt	50	2n+2

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* Tagesbaustelle

## D.2 B-Referenzbauwerk: 4-streifige Autobahn oben liegend

Fortsetzung Tabelle Einzelmaßnahmen Instandsetzung und Erneuerung B-Referenzbauwerk

Bauteilgruppe	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Verkehrsführung Autobahn oben
Fahrbahn (pro Überbau)	Austausch Deckschicht gesamt (1)	2	4s+0
	<i>Ausbau Belag</i>	1	4s+0
	<i>Deckschicht herstellen</i>	1	4s+0
	Austausch Deckschicht gesamt (2)	4	3s+1
	<i>Ausbau Belag</i>	2	3s+1
	<i>Deckschicht herstellen</i>	2	3s+1
	Austausch Deckschicht/Abdichtung (1)	21	4s+0
	<i>Ausbau Belag u. Abdichtung</i>	2	4s+0
	<i>Betoninstandsetzung nach 33 Jahren</i>	8	4s+0
	<i>Abdichtung Fahrbahnbereich einbauen</i>	10	4s+0
	<i>Deckschicht herstellen</i>	1	4s+0
	Austausch Deckschicht/Abdichtung (2)	29	4s+0
	<i>Ausbau Belag u. Abdichtung</i>	2	4s+0
	<i>Betoninstandsetzung nach 66 Jahren</i>	16	4s+0
	<i>Abdichtung Fahrbahnbereich einbauen</i>	10	4s+0
<i>Deckschicht herstellen</i>	1	4s+0	
Ausstattung (pro Überbau)	Entwässerung gesamt	8	4s+0
	<i>Straßenabläufe entfernen</i>	2	4s+0
	<i>Entwässerung einbauen (Straße)</i>	3	4s+0
	<i>Entwässerung einbauen (Randstreifen)</i>	3	4s+0
Überbau (pro Überbau)	Erneuerung Überbau	350	4s+0
	<i>Rückbau</i>	150	4s+0
	<i>Erstellung Überbau</i>	200	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens  
# zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

**D.2.3 Lebenszyklus B (Dreifeld Verbund-Hohlkastenbrücke), Präventivstrategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	110	4s+0
9	Verkehrsführung	6	3	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	8		
17	Verkehrsführung	6	2	3s+1
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	8	2	2n+2
25	Verkehrsführung	6	3	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	8		
33	Verkehrsführung	10	26	4s+0
	Erneuerung Kappen	78		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	24		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	42		
	Austausch Entwässerung	16		
	Verkehrsführung	6	15	2n+2
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	20		
	Betoninstandsetzung Pfeiler	30		
	Betoninstandsetzung Überbau	50		
	Betoninstandsetzung Widerlager	15	4	2n+2n*
	Austausch Elastomerlager	8		
41	Verkehrsführung	6	3	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	8		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	8	2	2n+2
50	Verkehrsführung	6	2	3s+1
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	50	10	2n+2
59	Verkehrsführung	6	3	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	8		
67	Verkehrsführung	10	28	4s+0
	Erneuerung Kappen	78		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	24		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	58		
	Austausch Entwässerung	16		
	Verkehrsführung	6	18	2n+2
	Betoninstandsetzung Überbau	50		
	Betoninstandsetzung Pfeiler	30		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	8		
	Betoninstandsetzung Widerlager	15	4	2n+2n*
	Austausch Elastomerlager	8		

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle

## D.2 B-Referenzbauwerk: 4-streifige Autobahn oben liegend

Fortsetzung Tabelle Lebenszyklus B (Dreifeld Hohlkastenbrücke), Präventivstrategie

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
75	Verkehrsführung	6	3	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	8		
83	Verkehrsführung	6	2	3s+1
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	20		
91	Verkehrsführung	6	3	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	8		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	8		
100	Rückbau	30	6	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

### D.2.4 Lebenszyklus B (Dreifeld Verbund-Hohlkastenbrücke), Strategie der gezielten Alterung

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	110	4s+0
17	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
33	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
50	Verkehrsführung	10	140	4s+0
	Erneuerung Überbau	700		
67	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
83	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
100	Rückbau	30	6	4s+0

s = Benutzung des Seitenstreifens

**D.2.5 Lebenszyklus B (Dreifeld Verbund-Hohlkastenbrücke),  
Zustandsbestimmte Strategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	110	4s+0
17	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
33	Verkehrsführung	10	27	4s+0
	Erneuerung Kappen	78		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	24		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	42		
	Austausch Entwässerung	16		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	50		
	Verkehrsführung	6	11	2n+2
	Austausch Elastomerlager	8	2	2n+2n*
50	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
67	Verkehrsführung	10	29	4s+0
	Erneuerung Kappen	78		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	24		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	58		
	Austausch Entwässerung	16		
	Verkehrsführung	6		
	Betoninstandsetzung Überbau	50	19	2n+2
	Betoninstandsetzung Pfeiler	30		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	50	4	2n+2n*
	Betoninstandsetzung Widerlager	15		
	Austausch Elastomerlager	8		
83	Verkehrsführung	10	4	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
100	Rückbau	30	6	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle



**D.2.6 Lebenszyklus B-I (Dreifeld Verbund-Hohlkastenbrücke mit Fingerübergängen und Kalottenlagern), Zustandsbestimmte Strategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	110	4s+0
17	Verkehrsführung	10	}	4s+0
	Deckschicht Fahrbahn	4		
33	Verkehrsführung	10	}	4s+0
	Erneuerung Kappen	}		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Dichtprofil Fingerübergang	4		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	42		
	Austausch Entwässerung	16		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	50		
	Verkehrsführung	6	11	2n+2
50	Verkehrsführung	10	}	4s+0
	Dichtprofil Fingerübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
67	Verkehrsführung	10	}	4s+0
	Erneuerung Kappen	}		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	58		
	Austausch Entwässerung	16		
	Verkehrsführung	6		
	Betoninstandsetzung Überbau	50		
	Betoninstandsetzung Pfeiler	30		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	50		
	Betoninstandsetzung Widerlager	15	4	2n+2n
83	Verkehrsführung	10	}	4s+0
	Dichtprofil Fingerübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	4		
100	Rückbau	30	6	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

### D.3 C-Referenzbauwerk: 4-streifige Autobahn oben liegend

#### D.3.1 Herstellungsphase C (Achtfeld Verbund-Hohlkastenbrücke)

Einzelmaßnahme	Wochenäquivalent [Wochen]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn	Datengrundlage
Verkehrsführung einrichten	1	1	4s+0	Bauzeitenkatalog
Abbruch Bestandsbauwerk	12	12	4s+0	Abschätzung
Erdarbeiten, Spundwände	10	27	4s+0	Referenzbrücken
Gründung	11		4s+0	Referenzbrücken
Fundamente	15		4s+0	Referenzbrücken
Pfeiler	21		4s+0	Referenzbrücken
Widerlager	4		4s+0	Referenzbrücken
Überbau Stahlbau	22	42	4s+0	Referenzbrücken
Montage Schalwagen	4		4s+0	Referenzbrücken
Überbau Betonbau	22		4s+0	Bauzeitenkatalog
2 Kappen inkl. Abdichtung	16	11	4s+0	Bauzeitenkatalog
Fahrbahnbelag, Ausstattung	6		4s+0	Referenzbrücken
Verkehrsführung rückbauen	1		4s+0	Bauzeitenkatalog
Gesamtwochen Herstellung	145	93		

## D.3.2 Einzelmaßnahmen Instandsetzung und Erneuerung C-Referenzbauwerk

Bauteilgruppe	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Verkehrsführung Autobahn
Verkehrsführung	Bau Mittelstreifenüberfahrten	3	3s+1/4s+0
	Verkehrsführung einrichten	3	3s+1/4s+0
	Verkehrsführung umbauen	1,5	2+2
	Verkehrsführung umbauen (mit FRT)	4	3s+1/4s+0
	Verkehrsführung rückbauen	3	3s+1/4s+0
Fahrbahnübergänge (pro Stück)	Dichtprofil Fahrbahnübergang	1	2n+1*
	Austausch Fahrbahnübergang gesamt (1)	7	4s+0
	<i>Ausbau</i>	1	4s+0
	<i>Einbau</i>	5	4s+0
	<i>Aushärten</i>	1	4s+0
	Austausch Fahrbahnübergang gesamt (2)	15	3s+1
	<i>Ausbau</i>	2	3s+1
	<i>Einbau</i>	11	3s+1
	<i>Aushärten</i>	2	3s+1
Lager (pro Stück)	Ausbau und Einbau Lager	0,5	2n+2 Tag*
Kappen,	Austausch Kappen gesamt	99	4s+0
Schutzeinrichtung,	<i>Schutzgerüst einbauen</i>	10	4s+0
Geländer (pro Überbau)	<i>Schutzeinrichtung ausbauen</i>	5	4s+0
	<i>Geländer u. Kappen ausbauen</i>	16	4s+0
	<i>Abdichtung unter Kappen einbauen</i>	13	4s+0
	<i>Kappen einbauen</i>	40	4s+0
	<i>Schutzeinrichtung einbauen</i>	10	4s+0
	<i>Geländer einbauen</i>	5	4s+0
Korrosionsschutz (pro Überbau)	Ausbesserung gesamt (5%)	12	2n+2
	Teilerneuerung gesamt (12,5 %)	30	2n+2
	Vollerneuerung gesamt (100%)	75	2n+2
Betoninstandsetzung	Widerlager gesamt	25	2n+2
	Unterseite Überbau gesamt	100	2n+2

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* Tagesbaustelle

## Anhang D: Definition von Bauzeiten und Verkehrsführungen

Fortsetzung Tabelle Einzelmaßnahmen Instandsetzung und Erneuerung C-Referenzbauwerk

Bauteilgruppe	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Verkehrsführung Autobahn oben
Fahrbahn (pro Überbau)	Austausch Deckschicht gesamt (1)	4	4s+0
	<i>Ausbau Belag</i>	2	4s+0
	<i>Deckschicht herstellen</i>	2	4s+0
	Austausch Deckschicht gesamt (2)	8	3s+1
	<i>Ausbau Belag</i>	4	3s+1
	<i>Deckschicht herstellen</i>	4	3s+1
	Austausch Deckschicht/Abdichtung (1)	49	4s+0
	<i>Ausbau Belag u. Abdichtung</i>	3	4s+0
	<i>Betoninstandsetzung nach 33 Jahren</i>	24	4s+0
	<i>Abdichtung Fahrbahnbereich einbauen</i>	20	4s+0
	<i>Deckschicht herstellen</i>	2	4s+0
	Austausch Deckschicht/Abdichtung (2)	70	4s+0
	<i>Ausbau Belag u. Abdichtung</i>	3	4s+0
	<i>Betoninstandsetzung nach 66 Jahren</i>	45	4s+0
	<i>Abdichtung Fahrbahnbereich einbauen</i>	20	4s+0
<i>Deckschicht herstellen</i>	2	4s+0	
Ausstattung (pro Überbau)	Entwässerung gesamt	20	4s+0
	<i>Straßenabläufe entfernen</i>	4	4s+0
	<i>Entwässerung einbauen (Straße)</i>	8	4s+0
	<i>Entwässerung einbauen (Randstreifen)</i>	8	4s+0
Überbau (pro Überbau)	Erneuerung Überbau	750	4s+0
	<i>Rückbau</i>	300	4s+0
	<i>Erstellung Überbau</i>	450	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benützung des Seitenstreifens  
# zusätzliche Sperrung für ein Wochenende

**D.3.3 Lebenszyklus C (Achtfeld Verbund-Hohlkastenbrücke), Präventivstrategie**

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	186	4s+0
9	Verkehrsführung	8	5	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	16		
17	Verkehrsführung	8	3	3s+1
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	24	5	2n+2
25	Verkehrsführung	8	5	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	16		
33	Verkehrsführung	13	59	4s+0
	Erneuerung Kappen	198		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	28		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	98		
	Austausch Entwässerung	40	50	2n+2
	Verkehrsführung	8		
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	60		
	Betoninstandsetzung Pfeiler	200		
	Betoninstandsetzung Überbau	200		
	Betoninstandsetzung Widerlager	25	5	2n+2n*
41	Verkehrsführung	8	5	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	16		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	24	5	2n+2
50	Verkehrsführung	8	3	3s+1
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	150	30	2n+2
59	Verkehrsführung	8	5	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	16		
67	Verkehrsführung	13	64	4s+0
	Erneuerung Kappen	198		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	28		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	140		
	Austausch Entwässerung	40	48	2n+2
	Verkehrsführung	10		
	Betoninstandsetzung Überbau	200		
	Betoninstandsetzung Pfeiler	200		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	24		
	Betoninstandsetzung Widerlager	25	5	2n+2n*

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle

## Anhang D: Definition von Bauzeiten und Verkehrsführungen

Fortsetzung Tabelle Lebenszyklus C (Achtfeld Verbund-Hohlkastenbrücke), Präventivstrategie

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
75	Verkehrsführung	8	5	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	16		
83	Verkehrsführung	8	3	3s+1
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Korrosionsschutz Teilerneuerung	60		
91	Verkehrsführung	8	5	3s+1
	Deckschicht Fahrbahn	16		
	Korrosionsschutz Ausbesserung	24	5	2n+2
100	Rückbau	60	12	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

### D.3.4 Lebenszyklus C (Achtfeld Verbund-Hohlkastenbrücke), Strategie der gezielten Alterung

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	186	4s+0
17	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
33	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
50	Verkehrsführung	13	250	4s+0
	Erneuerung Überbau	1500		
67	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
83	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
100	Rückbau	60	12	4s+0

s = Benutzung des Seitenstreifens

### D.3.5 Lebenszyklus C (Achtfeld Verbund-Hohlkastenbrücke), Zustandsbestimmte Strategie

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	186	4s+0
17	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
33	Verkehrsführung	13	59	4s+0
	Erneuerung Kappen	198		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	28		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	98		
	Austausch Entwässerung	40		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	150		
	Verkehrsführung	10	31	2n+2
50	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
67	Verkehrsführung	13	64	4s+0
	Erneuerung Kappen	198		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	28		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	140		
	Austausch Entwässerung	40		
	Verkehrsführung	10		
	Betoninstandsetzung Überbau	200	52	2n+2
	Betoninstandsetzung Pfeiler	200		
	Korrosionsschutz Vollerneuerung	150		
	Betoninstandsetzung Widerlager	25	5	2n+2n*
83	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
100	Rückbau	60	12	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle

### D.3.6 Lebenszyklus C (Achtfeld Verbund-Hohlkastenbrücke), WT-Stahl Zustandsbestimmte Strategie

Jahr	Einzelmaßnahme	Ansatz [Tage]	Zeit Parallelaktivitäten [Wochen]	Verkehrsführung Autobahn oben
0	Herstellung	-	186	4s+0
17	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
33	Verkehrsführung	13	59	4s+0
	Erneuerung Kappen	198		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	28		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	98		
	Austausch Entwässerung	40		
50	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
67	Verkehrsführung	13	64	4s+0
	Erneuerung Kappen	198		
	Austausch Schutzeinrichtungen			
	Austausch Fahrbahnübergang	28		
	Austausch Deckschicht/Abdichtung	140		
	Austausch Entwässerung	40		
	Verkehrsführung	10	42	2n+2
	Betoninstandsetzung Überbau	200		
	Betoninstandsetzung Pfeiler	200		
	Betoninstandsetzung Widerlager	25	5	2n+2n*
83	Verkehrsführung	13	5	4s+0
	Dichtprofil Fahrbahnübergang	4		
	Deckschicht Fahrbahn	8		
100	Rückbau	60	12	4s+0

n = keine Beeinflussung einer Fahrtrichtung, s = Benutzung des Seitenstreifens

\* zusätzliche Tagesbaustelle



## Anhang E: Verkehrsmodell

### Vorbemerkungen

In Folgenden wird das erstellte und in der Softwareumgebung Matlab implementierte Verkehrsmodell für die Berechnung von durch Brückenbaumaßnahmen induzierten externen Effekten im Detail erläutert. Vor allem der Ansatz des verwendeten makroskopischen deterministischen Warteschlangenmodells baut auf Arbeiten von RESSEL (1994) auf und wird in HELLMANN et al. (2002) und HELLMANN et al. (2008) weiterentwickelt. Ziel dieser bestehenden Arbeiten ist die Schaffung einer Basis für die Bewertung von Nutzerkosten im Rahmen des Erhaltungsmanagementsystems für Straßen (Pavement Management System), das unter Leitung der BASt entwickelt und betrieben wird. Die bestehenden Ansätze werden in dieser Arbeit auf die Randbedingungen von Brückenbaustellen angepasst und erweitert. Darüber hinaus wird die Möglichkeit der Integration von streuenden Eingangsparemtern in die Berechnungen geschaffen, um Ergebnisunsicherheiten beurteilen zu können.

Alle beschriebenen Eingangsparemter (Verkehrsganglinien, Fahrzeugflotte, Geschwindigkeitsfunktionen etc.) sind auf Deutschland regionalisiert. Eine direkte Anwendbarkeit in anderen Ländern ist damit nicht gegeben. In Abhängigkeit der Mikrolage des Brückenbauwerks besteht die Möglichkeit, eine weitere Verfeinerung der Eingangsparemter vorzunehmen. Hierauf wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, um eine Anwendbarkeit in ganz Deutschland zu ermöglichen und um für typische Autobahntypen repräsentative Vergleichswerte zu generieren.

## E.1 Grenzkapazitäten und Verkehrsaufkommen

### E.1.1 Leistungsfähigkeit Verkehrsführung

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Autobahnen wird ausgehend von einer Kapazität von 1.830 Fahrzeugen pro Fahrstreifen für alle Verkehrsführungen eine Kapazitätsreduzierung abhängig von verschiedenen Baustellensituationen vorgenommen. In Tabelle E.1 sind die kapazitätsreduzierenden Aspekte zusammengestellt und die im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigten Aspekte benannt.

Tabelle E.1: Situationsabhängige Reduktionsfaktoren zur Kapazitätsberechnung von Baustellenengpässen, Daten aus Stöckert und Klotz (1999), Ober-Sundermeier (2003) und Hellmann et al. (2008)

Situation/Aspekt	Reduktionsfaktor	Charakter	Umgang
Wegfall benachbarter Fahrstreifen	0,95	Baustellenauslegung	berücksichtigt
Überleitung auf Gegenfahrbahn	0,9	Baustellenauslegung	berücksichtigt
Fahrstreifenreduzierung rechts	0,9	Baustellenauslegung	berücksichtigt
Fahrstreifenreduzierung links	0,95	Baustellenauslegung	berücksichtigt
Schwerverkehr (SV)	Funktion $f_{SV,Steig}$	standortabhängig	berücksichtigt
Längsneigung (Steig)	Funktion $f_{SV,Steig}$	standortabhängig	berücksichtigt
Arbeitsaktivität in der Baustelle	0,95	zeitlich veränderlich	nicht berücksichtigt
schlechte Witterung	0,85-0,95	zeitlich veränderlich	nicht berücksichtigt
Fahren bei Dunkelheit	0,9	zeitlich veränderlich	nicht berücksichtigt
vorwiegender Urlaubsverkehr	0,9	Fahrerkollektiv	nicht berücksichtigt
hoch belastete Stadtautobahn	1,05-1,1	Fahrerkollektiv	nicht berücksichtigt
überregionale Verbindung	0,9-0,95	Fahrerkollektiv, Standort	nicht berücksichtigt
Lage außerhalb von Ballungsräumen	0,95	standortabhängig	nicht berücksichtigt

In dieser Arbeit werden nur Baustellen längerer Dauer analysiert, für Baustellen kürzerer Dauer (insbesondere Tagesbaustellen) sind andere Ansätze zu verwenden. Wenn die in Tabelle E.1 genannten festen Reduktionsfaktoren angewendet werden, ergeben sich – basierend auf einer Fahrstreifengrundkapazität von 1.830 Fahrzeugen pro Stunde und den jeweils genannten Verkehrsführungen – die in Tabelle E.2 und E.3 aufgeführten Baustellen-Grundkapazitäten.

Diese genannten Grundkapazitäten basieren auf den Reduktionsfaktoren, die in einer frühen Planungsphase bestimmbar sind. Zeitlich veränderliche Reduktionsfaktoren wie schlechte Witterung oder Dunkelheit sowie die vom Fahrerkollektiv abhängigen Parameter bleiben unberücksichtigt, so dass die hier angegebenen Werte als eine obere Grenze

Tabelle E.2: Verkehrsführungen und Grundkapazitäten verschiedener Baustellenauslegungen für zweispurige Autobahnen auf Basis von Hellmann et al. (2008)

Verkehrsführung	Visualisierung (Gegenfahrbahn links und Baustellenseite rechts)	Regelplan	Kapazität Gegenfahrbahn	Kapazität Baustellenseite
2n+2n		-	3660	3660
2n+2		D I/1,2	3660	3569
4s+0		D II/2	3569	3391
2+0		D II/3	1739	1652
2n+1		D I/3	3660	1739
3s+1		D II/1	3569	3569
1+1		-	1739	1739
3s+0		D II/4	3569	1652

Tabelle E.3: Verkehrsführungen und Grundkapazitäten verschiedener Baustellenauslegungen für dreispurige Autobahnen auf Basis von Hellmann et al. (2008)

Verkehrsführung	Visualisierung (Gegenfahrbahn links und Baustellenseite rechts)	Regelplan	Kapazität Gegenfahrbahn	Kapazität Baustellenseite
3n+3n		-	5490	5490
3n+3		D I/5	5490	5308
3+3		-	5308	5308
3n+2		D I/6	5490	3482
4s+2		D II/5	5308	5308
4+0		D II/7	3482	3308
2+2		-	3482	3482
5s+1		D II/6	5308	5134
6s+0		-	5308	5043
5s+0		D II/8	5308	3308
3+1		-	3569	3482

der Grundkapazitäten anzusehen sind. Die genannten Grundkapazitäten beinhalten alle von der Baustellenauslegung beeinflussten Reduktionsfaktoren aus Tabelle E.1, diese Werte müssen abhängig von der Längsneigung und dem Schwerverkehranteil allerdings noch weiter herabgesetzt werden. Hierfür wird eine Reduktionsfunktion  $f_{SV,Steig}$  nach Gl. E.1 und Gl. E.2 verwendet:

$$f_{SV,Steig} = \frac{1}{1 - 0,01 \cdot SVA + 0,01 \cdot SVA \cdot E} \quad (E.1)$$

$$E = 1,5 + a \cdot SVA^{-b}, \quad \text{wobei } SVA > 0 \quad (E.2)$$

mit  $SVA =$  Schwerverkehrsanteil [%]

$E =$  PKW-Äquivalenzfaktor zur Umrechnung des Schwerverkehrs [-]

$a, b =$  Funktionsparameter abhängig von Längsneigung u. Abschnittlänge [-]

Gl. E.1 wird von BECKMANN und ZACKOR (2001) vorgeschlagen und HELLMANN et al. (2008) führen die Funktionsparameter  $a$  und  $b$  nach Gl. E.2 ein, die auf Grundlage der Längsneigung  $s$  (Steigung) und Bauabschnittlänge  $L_B$  ermittelt werden. Als iterativ ermittelte Lösung ergeben sich für  $a$  und  $b$  abhängig vom Längsneigungsintervall nach Gl. E.3 bis E.5 folgende Ansätze:

$$\begin{aligned} a &= 4,048181291 \cdot L_B^{0,230681468} \cdot (-s - 2)^{0,290623818} \\ b &= 3,492256248 \cdot L_B^{-0,453621364} \cdot (-s - 2)^{-1,219859063}, \quad \text{für } s < -2 \end{aligned} \quad (\text{E.3})$$

$$\begin{aligned} a &= 0 \\ b &= 100, \quad \text{für } -2 \leq s \leq 0 \end{aligned} \quad (\text{E.4})$$

$$\begin{aligned} a &= 4,048181291 \cdot L_B^{0,230681468} \cdot s^{0,290623818} \\ b &= 3,492256248 \cdot L_B^{-0,453621364} \cdot s^{-1,219859063}, \quad \text{für } s > 0 \end{aligned} \quad (\text{E.5})$$

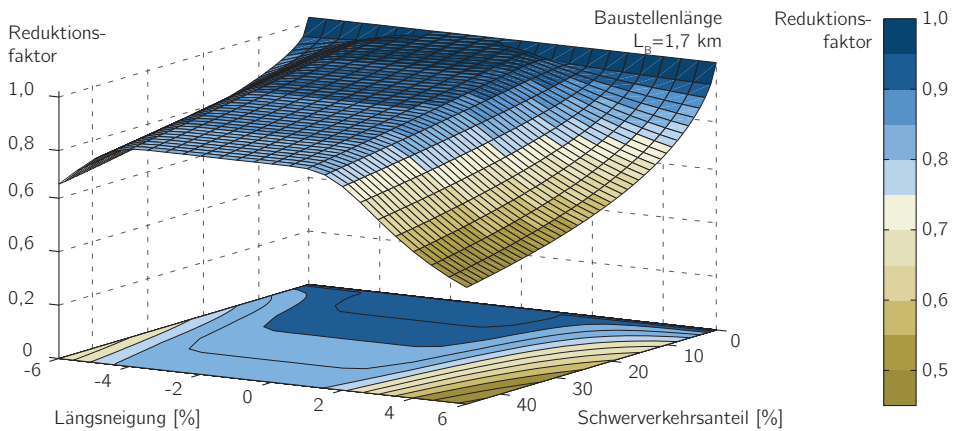


Abbildung E.1: Von der Längsneigung und dem Schwerverkehrsanteil abhängiger Reduktionsfaktor für die Baustellenlänge von 1,7 km zur Berechnung der Grenzkapazität von Verkehrsführungen

Als Ergebnis kann für verschiedene Baustellenlängen eine vom Schwerverkehrsanteil und der Längsneigung abhängige Abminderungsfunktion bestimmt werden. Für eine Baustellenlänge von 1,7 km, die standardmäßig im Rahmen dieser Arbeit angesetzt wird und

sich aus den Baustellen-Regelplänen für die Verkehrsführungen ergibt, resultiert der in Abbildung E.1 dargestellte Graph für den Reduktionsfaktor.

Die Grundkapazitäten nach Tabelle E.2 und E.3 müssen mit dem beschriebenen Reduktionsfaktor  $f_{SV,Steig}$  multipliziert werden, um die endgültige Grenzkapazität des Baustellenengpasses  $Q_{grenz}$  zu erhalten.

### E.1.2 Verkehrsnachfrage

Die Verkehrsnachfrage wird für PKW und Schwerverkehr getrennt berechnet. Als Eingangswerte dienen der durchschnittliche tägliche Verkehr (DTV in Fahrzeugen pro Tag, PKW und Schwerverkehr zusammengefasst) sowie der Schwerverkehrsanteil (SVA, in Prozent), die in Abhängigkeit der untersuchten Autobahntypen festgelegt werden. Eine Erläuterung der definierten vier Autobahntypen findet sich in Abschnitt 5.1.3. Die Anzahl der Fahrzeuge getrennt nach PKW und SV werden mit Hilfe von Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien auf eine stündliche Verkehrsnachfrage umgerechnet.

Da im Vorhinein nicht bekannt ist, wann im Jahresablauf die Bauaktivitäten durchgeführt werden, wird die in HELLMANN et al. (2008) entwickelte Repräsentativbauwoche angewendet, die in Abschnitt 4.3.3 erläutert wird. Zur Umrechnung des jahresbezogenen DTV auf den DTV der repräsentativen Bauwoche werden die in Tabelle E.4 angegebenen jahresganglinienabhängigen Erhöhungsfaktoren verwendet.

Tabelle E.4: Erhöhungsfaktor  $e_{RB}$  zur Berücksichtigung der Art der Jahresganglinie bei der Bestimmung des DTV in der repräsentativen Bauwoche (Hellmann et al. 2008)

Jahresganglinie	A	B	C	D	E	F	G
Erhöhungsfaktor $e_{RB}$	1,0529	1,0433	1,0684	1,0432	1,0459	1,0491	1,0593

Auf Grundlage der genannten Faktoren kann die Gesamtverkehrsnachfrage der repräsentativen Bauwoche bestimmt werden:

$$DWV_{RB} = DTV \cdot e_{RB} \cdot 7 \tag{E.6}$$

mit  $DWV_{RB}$  = durchschnittlich wöchentlicher Verkehr Repräsentativwoche [Kfz]

$DTV$  = autobahntypenabhängiger Eingangswert des DTV [Kfz]

$e_{RB}$  = Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung der Jahresganglinienart nach Tabelle E.4 [-]

Der errechnete Wochenwert  $DWV_{RB}$  wird mit Hilfe von Wochenganglinien auf die einzelnen Tage und mit Hilfe von Tagesganglinien auf die einzelnen Tagesstunden aufgeteilt. Da die Ergebnisse eine Allgemeingültigkeit für Deutschland aufweisen sollen, wird nicht mit fallspezifischen Ganglinien gearbeitet, sondern es werden typisierte Wochen- und Tagesganglinien für PKW verwendet, die von PINKOFSKY (2006) erarbeitet wurden und auch von der BASt angewendet werden. In Abbildung E.2 sind die verwendeten Wochenganglinien (WGL, links) und beispielhaft vier Tagesganglinien (TGL, rechts) dargestellt.

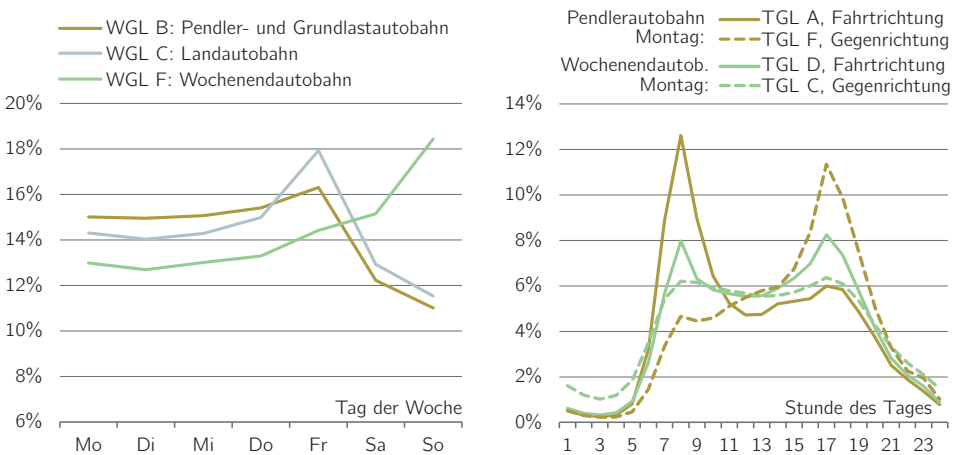


Abbildung E.2: Typisierte PKW-Wochenganglinien für die untersuchten Autobahntypen (links) und beispielhafte PKW-Tagesganglinien für Montag getrennt nach Fahr- und Gegenrichtung (rechts), Datengrundlage Pinkofsky (2006)

Für den Schwerverkehr existieren diese ausführlichen Typisierungen nicht, daher müssen zusätzliche Annahmen getroffen werden. Zur Abbildung der Wochenganglinien werden für den Schwerverkehr für die Tagesgruppe von Montag bis Freitag, für Samstag und für Sonntag jeweils unterschiedliche Werte angenommen. Analog zu OBER-SUNDERMEIER und OTTO (2003) wird für Samstag und Sonntag ein konstanter Schwerverkehrsanteil  $SVA$  von 5 % angesetzt:

$$SVA_{Sa} = SVA_{So} = 0,05 \quad (E.7)$$

Damit kann der durchschnittliche tägliche Schwerverkehr der Repräsentativbauwoche am Wochenende ( $DTSV_{RB,Sa}$  und  $DTSV_{RB,So}$ ) bestimmt werden:

$$DTSV_{RB,Sa} = SVA_{Sa} \cdot DTV_{RB,Sa} \quad \text{und} \quad DTSV_{RB,So} = SVA_{So} \cdot DTV_{RB,So} \quad (E.8)$$

Auf Grundlage der bekannten täglichen Verkehrsnachfrage für alle Tage der Woche und den gegebenen durchschnittlichen Schwerverkehrsanteil  $SVA$  lässt sich so der einheitliche Schwerverkehrsanteil  $SVA_{Mo-Fr}$  für die Tage von Montag bis Freitag berechnen, auf deren Basis dann für alle Tage die Anzahl der Fahrzeuge getrennt nach PKW und Schwerverkehr bestimmt werden kann:

$$SVA_{Mo-Fr} = \frac{(DWV_{RB} \cdot SVA) - (DTSV_{RB, Sa} + DTSV_{RB, So})}{DWV_{RB} - (DTV_{RB, Sa} + DTV_{RB, So})} \quad (E.9)$$

mit  $DTSV_{RB, Sa/So}$  = durchschnittlicher täglicher Schwerverkehr am Wochenende  
der Repräsentativbauwoche [Kfz]

$DTV_{RB, Sa/So}$  = durchschnittlicher täglicher Verkehr am Wochenende  
der Repräsentativbauwoche [Kfz]

$DWV_{RB}$  = durchschnittlicher wöchentlicher Verkehr  
der Repräsentativbauwoche [Kfz]

Die Umrechnung auf die stündliche Verkehrsnachfrage  $Q_{vor}$  erfolgt für jeden Wochentag separat und getrennt für PKW und Schwerverkehr, da beide Verkehrsarten unterschiedliche Tagesganglinien besitzen. Da für die Schwerverkehrsganglinien keine aktuellen Erhebungen existieren (HELLMANN et al. 2008), wird auf die älteren Arbeiten von SCHMUCK (1987) zurückgegriffen, der für die Tage Montag bis Freitag, Samstag und Sonntag drei unterschiedliche Schwerverkehrs-Tagesganglinien angibt. Die Tagesverläufe für den Schwerverkehr sind dabei im Vergleich zu denen der PKW über den Tag deutlich gleichmäßiger verteilt.

Die typisierten Tagesganglinien sind in Tabelle E.5 bis E.9 zusammengestellt. Die Tagesganglinien A bis H sind dabei für PKW anzuwenden und stammen aus PINKOFSKY (2006), wobei nicht für alle Wochentage alle Ganglinientypen existieren. Die Tagesganglinie SV ist jeweils diejenige für den Schwerverkehr aus SCHMUCK (1987). Die Tage Dienstag bis Donnerstag werden aufgrund der gleichen Tagesganglinien zusammengefasst betrachtet.

Tabelle E.5: Typisierte Tagesganglinien Montag (Pinkofsky (2006), Schmuck (1987))

Stunde	TGL A	TGL B	TGL C	TGL D	TGL E	TGL F	TGL G	TGL SV
1	0,51%	0,64%	1,61%	0,62%	0,61%	0,51%	1,57%	2,06%
2	0,31%	0,40%	1,20%	0,40%	0,40%	0,30%	1,10%	1,83%
3	0,26%	0,33%	1,03%	0,33%	0,32%	0,22%	0,87%	1,71%
4	0,33%	0,43%	1,19%	0,43%	0,40%	0,24%	1,00%	1,91%
5	0,81%	0,98%	1,87%	0,91%	0,77%	0,46%	1,72%	2,30%
6	3,23%	3,13%	3,49%	2,65%	2,22%	1,45%	3,85%	3,20%
7	8,89%	7,23%	5,43%	5,67%	4,53%	3,37%	7,00%	4,36%
8	12,61%	9,80%	6,21%	7,97%	5,77%	4,66%	8,51%	4,95%
9	8,96%	7,46%	6,15%	6,32%	5,27%	4,45%	7,48%	5,57%
10	6,44%	6,20%	5,93%	5,83%	5,40%	4,59%	6,40%	5,79%
11	5,23%	5,55%	5,78%	5,66%	5,71%	5,10%	5,64%	6,02%
12	4,73%	5,17%	5,68%	5,54%	5,81%	5,49%	5,31%	6,11%
13	4,75%	5,21%	5,54%	5,56%	5,87%	5,79%	5,13%	5,88%
14	5,22%	5,65%	5,58%	5,89%	6,06%	5,96%	5,23%	5,87%
15	5,33%	5,85%	5,72%	6,34%	6,65%	6,75%	5,21%	6,11%
16	5,44%	6,13%	6,01%	6,98%	7,71%	8,38%	5,34%	6,11%
17	6,00%	6,91%	6,37%	8,26%	9,26%	11,34%	5,73%	5,78%
18	5,83%	6,52%	6,09%	7,36%	8,19%	9,87%	5,60%	5,21%
19	4,85%	5,29%	5,35%	5,77%	6,51%	7,49%	4,89%	4,48%
20	3,74%	4,00%	4,27%	4,16%	4,53%	5,05%	3,91%	3,77%
21	2,51%	2,70%	3,32%	2,82%	3,06%	3,29%	3,00%	3,19%
22	1,89%	2,03%	2,61%	2,09%	2,19%	2,27%	2,37%	2,86%
23	1,37%	1,53%	2,09%	1,59%	1,78%	1,95%	1,84%	2,62%
24	0,78%	0,89%	1,49%	0,88%	0,97%	1,03%	1,31%	2,31%

Tabelle E.6: Typisierte Tagesganglinien Dienstag bis Donnerstag (Pinkofsky (2006), Schmuck (1987))

Stunde	TGL A	TGL B	TGL C	TGL D	TGL E	TGL F	TGL SV
1	0,43%	0,62%	1,13%	0,53%	0,57%	0,55%	2,06%
2	0,25%	0,41%	0,91%	0,35%	0,36%	0,30%	1,83%
3	0,22%	0,36%	0,84%	0,30%	0,29%	0,21%	1,71%
4	0,28%	0,44%	0,93%	0,36%	0,34%	0,22%	1,91%
5	0,67%	0,93%	1,39%	0,73%	0,63%	0,40%	2,30%
6	2,94%	2,97%	2,82%	2,37%	1,98%	1,30%	3,20%
7	8,72%	7,04%	4,82%	5,47%	4,35%	3,26%	4,36%
8	12,45%	9,39%	5,92%	7,76%	5,65%	4,49%	4,95%
9	8,73%	7,43%	6,02%	6,31%	5,27%	4,38%	5,57%
10	6,15%	6,07%	5,81%	5,84%	5,36%	4,59%	5,79%
11	5,02%	5,32%	5,54%	5,57%	5,53%	5,04%	6,02%
12	4,56%	4,98%	5,43%	5,39%	5,61%	5,38%	6,11%
13	4,72%	5,14%	5,47%	5,54%	5,76%	5,70%	5,88%
14	5,27%	5,62%	5,73%	6,01%	6,09%	6,04%	5,87%
15	5,42%	5,80%	6,00%	6,44%	6,73%	6,81%	6,11%
16	5,55%	6,08%	6,37%	7,04%	7,76%	8,39%	6,11%
17	6,16%	6,69%	6,74%	8,17%	9,18%	11,10%	5,78%
18	6,07%	6,51%	6,58%	7,42%	8,27%	9,73%	5,21%
19	5,18%	5,58%	5,95%	5,98%	6,73%	7,61%	4,48%
20	4,03%	4,34%	4,85%	4,38%	4,82%	5,25%	3,77%
21	2,70%	3,04%	3,76%	3,03%	3,32%	3,50%	3,19%
22	2,04%	2,31%	2,95%	2,23%	2,35%	2,42%	2,86%
23	1,53%	1,78%	2,35%	1,74%	1,93%	2,10%	2,62%
24	0,91%	1,14%	1,70%	1,03%	1,12%	1,21%	2,31%



## E.1 Grenzkapazitäten und Verkehrsaufkommen

Tabelle E.7: Typisierte Tagesganglinien Freitag (Pinkofsky (2006), Schmuck (1987))

Stunde	TGL A	TGL B	TGL C	TGL D	TGL E	TGL F	TGL SV
1	0,51%	0,63%	0,94%	0,56%	0,76%	0,62%	2,06%
2	0,31%	0,42%	0,69%	0,35%	0,52%	0,36%	1,83%
3	0,25%	0,34%	0,62%	0,26%	0,41%	0,24%	1,71%
4	0,30%	0,39%	0,69%	0,28%	0,43%	0,24%	1,91%
5	0,67%	0,78%	1,12%	0,52%	0,68%	0,37%	2,30%
6	2,77%	2,64%	2,63%	1,84%	1,71%	1,08%	3,20%
7	7,89%	6,21%	4,81%	4,46%	3,53%	2,55%	4,36%
8	11,33%	8,49%	5,82%	6,89%	4,57%	3,75%	4,95%
9	7,91%	6,49%	5,39%	5,54%	4,39%	3,78%	5,57%
10	5,71%	5,47%	5,14%	5,29%	4,61%	4,16%	5,79%
11	4,94%	5,17%	5,23%	5,33%	5,09%	4,78%	6,02%
12	4,76%	5,17%	5,50%	5,52%	5,57%	5,39%	6,11%
13	5,31%	5,77%	6,14%	6,27%	6,59%	6,61%	5,88%
14	5,84%	6,32%	6,61%	6,90%	7,37%	7,82%	5,87%
15	6,03%	6,57%	6,72%	7,56%	7,91%	9,09%	6,11%
16	5,98%	6,58%	6,74%	7,96%	8,45%	9,97%	6,11%
17	5,74%	6,45%	6,66%	7,49%	7,99%	9,23%	5,78%
18	5,52%	6,09%	6,39%	6,81%	7,32%	8,09%	5,21%
19	5,09%	5,58%	5,96%	5,95%	6,43%	6,85%	4,48%
20	4,36%	4,68%	5,04%	4,78%	5,16%	5,21%	3,77%
21	3,12%	3,45%	3,92%	3,42%	3,79%	3,68%	3,19%
22	2,37%	2,61%	2,99%	2,49%	2,73%	2,43%	2,86%
23	1,91%	2,12%	2,43%	2,04%	2,29%	2,10%	2,62%
24	1,40%	1,56%	1,83%	1,49%	1,70%	1,61%	2,31%

Tabelle E.8: Typisierte Tagesganglinien Samstag (Pinkofsky (2006), Schmuck (1987))

Stunde	TGL A	TGL B	TGL C	TGL D	TGL E	TGL F	TGL G	TGL H	TGL SV
1	1,77%	1,49%	1,20%	1,70%	1,12%	1,15%	1,49%	0,88%	5,34%
2	1,28%	1,09%	0,85%	1,21%	0,73%	0,82%	1,05%	0,60%	4,83%
3	0,99%	0,85%	0,65%	0,87%	0,54%	0,62%	0,75%	0,41%	4,40%
4	0,88%	0,76%	0,56%	0,69%	0,46%	0,55%	0,58%	0,31%	3,76%
5	1,04%	0,93%	0,63%	0,69%	0,62%	0,65%	0,55%	0,38%	3,76%
6	1,74%	1,73%	1,28%	1,23%	1,25%	1,24%	1,03%	0,82%	4,78%
7	2,43%	2,60%	2,12%	1,95%	1,95%	2,08%	1,73%	1,42%	5,87%
8	3,48%	4,05%	3,25%	2,81%	2,99%	3,48%	2,40%	2,41%	6,60%
9	4,98%	5,83%	5,11%	4,18%	4,53%	5,70%	3,74%	3,84%	7,01%
10	6,16%	7,46%	7,17%	5,70%	6,27%	8,27%	5,50%	5,33%	6,80%
11	6,69%	8,15%	8,25%	6,72%	6,84%	9,62%	6,92%	5,77%	6,14%
12	6,68%	7,49%	7,66%	7,01%	6,49%	8,72%	7,55%	5,60%	5,39%
13	6,59%	6,75%	6,97%	7,17%	6,26%	7,61%	7,90%	5,52%	4,62%
14	6,81%	6,70%	7,24%	7,63%	6,42%	7,41%	8,48%	6,35%	4,50%
15	6,83%	6,57%	7,83%	8,15%	6,81%	7,27%	9,36%	7,06%	4,65%
16	6,26%	5,82%	6,90%	7,26%	6,84%	6,20%	8,06%	7,86%	4,00%
17	6,11%	5,56%	6,45%	6,86%	7,41%	5,59%	7,42%	9,11%	3,60%
18	6,09%	5,62%	6,20%	6,20%	8,19%	5,25%	6,11%	10,28%	3,30%
19	5,89%	5,31%	5,40%	5,76%	7,26%	4,71%	5,25%	8,94%	2,80%
20	5,05%	4,60%	4,35%	4,76%	5,58%	3,95%	4,21%	6,32%	2,28%
21	3,95%	3,58%	3,36%	3,65%	4,06%	3,06%	3,22%	4,22%	1,71%
22	3,14%	2,80%	2,64%	2,88%	3,02%	2,39%	2,47%	2,99%	1,42%
23	2,80%	2,39%	2,24%	2,68%	2,49%	2,05%	2,29%	2,07%	1,31%
24	2,37%	1,88%	1,71%	2,27%	1,91%	1,62%	1,94%	1,52%	1,13%

Tabelle E.9: Typisierte Tagesganglinien Sonntag (Pinkofsky (2006), Schmuck (1987))

Stunde	TGL A	TGL B	TGL C	TGL D	TGL E	TGL F	TGL G	TGL SV
1	2,19%	1,78%	1,98%	1,89%	1,30%	1,46%	1,37%	1,85%
2	1,65%	1,33%	1,52%	1,42%	0,97%	1,09%	1,01%	1,58%
3	1,16%	0,95%	1,09%	1,01%	0,67%	0,79%	0,72%	1,18%
4	0,91%	0,74%	0,80%	0,76%	0,50%	0,56%	0,56%	0,91%
5	0,82%	0,63%	0,64%	0,63%	0,41%	0,45%	0,47%	0,75%
6	0,96%	0,75%	0,79%	0,78%	0,58%	0,54%	0,61%	1,08%
7	1,18%	1,05%	0,90%	0,89%	0,94%	0,68%	0,71%	1,65%
8	1,73%	1,73%	1,15%	1,25%	1,59%	0,95%	1,02%	2,52%
9	2,90%	3,24%	2,23%	2,28%	3,29%	1,98%	1,99%	3,74%
10	4,39%	5,47%	4,06%	3,86%	6,13%	4,04%	3,57%	4,63%
11	5,67%	7,48%	5,67%	5,23%	9,22%	6,31%	4,95%	5,10%
12	6,25%	8,42%	6,58%	5,98%	10,66%	7,56%	5,65%	5,28%
13	6,24%	7,45%	6,61%	6,05%	9,43%	7,52%	5,73%	5,09%
14	6,57%	7,24%	7,75%	6,93%	8,65%	9,06%	7,18%	5,44%
15	6,96%	7,32%	8,92%	7,73%	8,50%	10,84%	8,32%	6,03%
16	6,76%	6,65%	7,97%	7,56%	7,00%	9,26%	8,46%	6,16%
17	6,91%	6,45%	7,75%	8,00%	5,98%	8,40%	9,59%	6,52%
18	7,34%	6,74%	7,98%	8,87%	5,89%	8,01%	10,86%	7,24%
19	7,20%	6,36%	7,30%	8,13%	5,23%	6,61%	9,25%	7,48%
20	6,43%	5,55%	6,08%	6,80%	4,18%	5,09%	6,86%	6,61%
21	5,39%	4,49%	4,70%	5,34%	3,13%	3,61%	4,85%	5,10%
22	4,32%	3,50%	3,47%	3,94%	2,48%	2,53%	3,14%	4,17%
23	3,54%	2,78%	2,59%	2,95%	2,05%	1,76%	2,03%	5,21%
24	2,54%	1,92%	1,49%	1,74%	1,26%	0,93%	1,07%	4,68%

## E.2 Kapazitätsreduzierungen

### E.2.1 Baustellenbereiche

Zur Modellierung der Auswirkungen des Baustellenbereichs wird davon ausgegangen, dass die Baustelle einen Trichter darstellt, durch den der Verkehr geführt werden muss. In den unterschiedlichen Bereichen der Baustelle stellen sich unterschiedliche Geschwindigkeiten ein, die einzeln berechnet werden. Abbildung E.3 gibt einen Überblick der angesetzten Baustellenbereiche. Der Ansatz der Geschwindigkeitsbegrenzung auf 100 km/h im kompletten Annäherungsbereich deckt sich nicht mit den Verkehrsführungs-Regelplänen, bei denen bereits 300 m vor der Einengung eine Geschwindigkeit von 80 km/h gefordert wird. Der gewählte Ansatz unterschätzt damit die entstehenden Zeitverluste leicht.

Die bereichsabhängigen Geschwindigkeiten werden stundengenau auf Basis der vorhandenen stündlichen Verkehrsstärken an PKW ( $Q_{PKW}$ ) und Schwerverkehr ( $Q_{SV}$ ) sowie der Längsneigung  $LN$  in Abhängigkeit der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und zur Verfügung stehenden Fahrspuren berechnet. In Ermangelung neuerer Ansätze wird analog

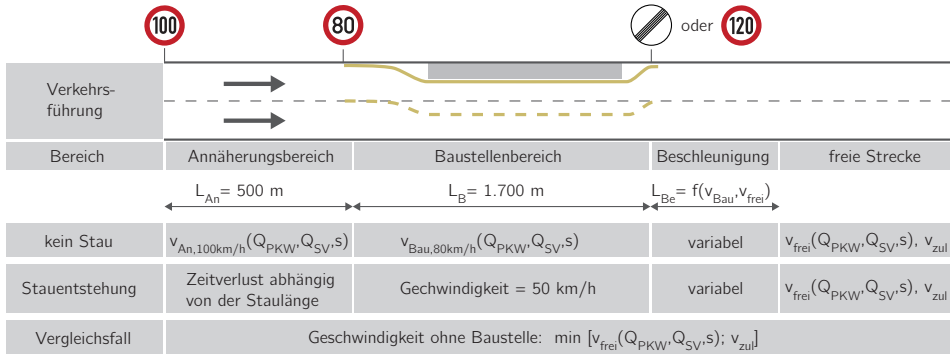


Abbildung E.3: Verwendete Berechnungsansätze für die unterschiedlichen Baustellenbereiche und verschiedene Verkehrszustände

zu HELLMANN et al. (2002) auf die Geschwindigkeitsfunktionen aus SCHMUCK (1987) und für den Vergleichsfall ohne Baustelle auf die EWS (1997) zurückgegriffen. Im Rahmen der Berechnung wird angenommen, dass die geforderten zulässigen Geschwindigkeiten eingehalten werden, auch wenn Untersuchungen von BAKABA et al. (2012) zeigen, dass die tatsächlich gefahrenen mittleren Geschwindigkeiten die zulässigen Geschwindigkeiten teilweise deutlich überschreiten, vor allem im Annäherungsbereich. Die zur Geschwindigkeitsermittlung verwendeten Funktionen für die Fahrt auf freier Strecke nach der EWS (1997) in jeder betrachteten Stunde sind in Gl. E.10 bis E.12 zusammengestellt.

Freie Strecke, keine Geschwindigkeitsbegrenzung, zwei Richtungsfahrstreifen:

$$\begin{aligned} v_{frei,PKW} &= 138,6 - 8 \cdot e^{0,235 \cdot s} - 0,1 \cdot e^{1,643 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{PKW} + 2 \cdot Q_{SV})} \\ v_{frei,SV} &= 86,1 - 6 \cdot e^{0,248 \cdot s} - 0,1 \cdot e^{9,218 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{SV}} \end{aligned} \quad (\text{E.10})$$

Freie Strecke, keine Geschwindigkeitsbegrenzung, drei Richtungsfahrstreifen:

$$\begin{aligned} v_{frei,PKW} &= 143,1 - 8 \cdot e^{0,235 \cdot s} - 0,1 \cdot e^{1,157 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{PKW} + 2 \cdot Q_{SV})} \\ v_{frei,SV} &= 86,1 - 6 \cdot e^{0,248 \cdot s} - 0,1 \cdot e^{4,609 \cdot 10^{-3} \cdot Q_{SV}} \end{aligned} \quad (\text{E.11})$$

Freie Strecke, Geschwindigkeitsbegrenzung  $v_{zul}$ , zwei bzw. drei Richtungsfahrstreifen:

$$\begin{aligned} v_{frei,PKW} &= \min \begin{cases} v_{frei,PKW} \text{ aus Gl. E.10 bzw. Gl. E.11} \\ v_{zul} \end{cases} \\ v_{frei,SV} &= v_{frei,SV} \text{ aus Gl. E.10 bzw. Gl. E.11} \end{aligned} \quad (\text{E.12})$$

- mit  $Q_{PKW}$  = vorhandene stündliche Verkehrsnachfrage PKW [Kfz]  
 $Q_{SV}$  = vorhandene stündliche Verkehrsnachfrage Schwerverkehr [Kfz]  
 $s$  = Längsneigung der Fahrbahn (entspricht der Steigung, [%])  
 $v_{zul}$  = zulässige Höchstgeschwindigkeit [km/h]

Die zur Geschwindigkeitsermittlung verwendeten Funktionen für die Fahrt im Annäherungs- und Baustellenbereich mit Geschwindigkeitsbegrenzung basieren auf SCHMUCK (1987), werden in jeder betrachteten Stunde berechnet und sind in Gl. E.13 bis E.16 zusammengestellt.

Baustelle, Geschwindigkeitsbegrenzung  $v_{zul} = 80$  km/h, ein Richtungsfahrstreifen:

$$v_{80,PKW} = \max \begin{cases} 94 - 8 \cdot e^{0,3 \cdot s} - 1,5 \cdot e^{2,27 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{PKW} + 2 \cdot Q_{SV})} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases} \quad (E.13)$$

$$v_{80,SV} = \max \begin{cases} 83 - 6 \cdot e^{0,3 \cdot s} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

Baustelle, Geschwindigkeitsbegrenzung  $v_{zul} = 80$  km/h, zwei Richtungsfahrstreifen:

$$v_{80,PKW} = \max \begin{cases} 96,5 - 8 \cdot e^{0,17 \cdot s} - 0,5 \cdot e^{1,58 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{PKW} + 2 \cdot Q_{SV})} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases} \quad (E.14)$$

$$v_{80,SV} = \max \begin{cases} 83 - 6 \cdot e^{0,3 \cdot s} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

Baustelle, Geschwindigkeitsbegrenzung  $v_{zul} = 80$  km/h, drei Richtungsfahrstreifen:

$$v_{80,PKW} = \max \begin{cases} 96,5 - 8 \cdot e^{0,17 \cdot s} - 0,5 \cdot e^{0,95 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{PKW} + 2 \cdot Q_{SV})} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases} \quad (E.15)$$

$$v_{80,SV} = \max \begin{cases} 83 - 6 \cdot e^{0,3 \cdot s} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

Baustelle, Geschwindigkeit  $v_{zul} = 100$  km/h, zwei bzw. drei Richtungsfahrstreifen:

$$v_{100,PKW} = \max \begin{cases} 108,5 - 8 \cdot e^{0,17 \cdot s} - 0,5 \cdot e^{1,44 \cdot 10^{-3} \cdot (Q_{PKW} + 2 \cdot Q_{SV})} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases} \quad (E.16)$$

$$v_{100,SV} = \max \begin{cases} 85 - 6 \cdot e^{0,3 \cdot s} \\ 50 \text{ km/h} \end{cases}$$

Alle aufgeführten Gleichungen sind nur anwendbar, wenn keine Staubildung eintritt, die Grenzkapazität des Baustellenengpasses also oberhalb der vorhandenen Verkehrsnachfrage liegt. Für den Fall einer Staubildung wird das im Folgenden vorgestellte makroskopische deterministische Warteschlangenmodell auf Basis der Arbeiten von RESSEL (1994) verwendet.

## E.2.2 Makroskopisches deterministisches Warteschlangenmodell

### E.2.2.1 Wartezeiten und Rückstaulängen

Im Rahmen der Modellierung von Stautestehungen wird angenommen, dass Staus vollständig im Annäherungsbereich (bei einer Länge von mehr als 500 m zusätzlich auf der davor liegenden freien Strecke) entstehen. Innerhalb des Baustellenbereichs wird davon ausgegangen, dass keine Stauungen entstehen. Für den Fall des Auftretens von Staus wird eine Geschwindigkeit von 50 km/h (PKW und SV) im Baustellenbereich angesetzt.

Auf Basis der Grenzkapazität (siehe Abschnitt E.1.1) der jeweiligen Verkehrsführung und des stündlichen Verkehrsaufkommens (siehe Abschnitt E.1.2) kann bei Überschreiten der Grenzkapazität die jeweilige sich aufbauende Warteschlange im Stau stundengenau berechnet werden:

$$\bar{M}_S = M_{S,A} + 0,5 \cdot (Q_{vor} - Q_{grenz}) \quad (E.17)$$

mit  $\bar{M}_S$  = mittlere Anzahl der Kraftfahrzeuge innerhalb einer Staustunde [Kfz]

$M_{S,A}$  = Anzahl der im Stau stehenden Fahrzeuge am Stundenanfang [Kfz]  
 = Anzahl der im Stau stehenden Fahrzeuge am Ende der  
 vorhergehenden Stunde [Kfz]

$Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsstärke aus PKW und SV [Kfz]

$Q_{grenz}$  = maximale Verkehrsstärke (entspricht der Grenzkapazität, [Kfz])

Die Berechnungen werden mit der vorhandenen Verkehrsstärke  $Q_{vor}$  durchgeführt, die sich aus Addition der Personenkraftwagen und Schwerverkehrsfahrzeuge ergibt. Beide Fahrzeugarten müssen zusammen betrachtet werden, da der im Vergleich zum PKW unterschiedliche Einfluss des Schwerverkehrs schon im Rahmen der Berechnung der Grenzkapazität berücksichtigt wird. Wie in Abschnitt E.1.1 beschrieben, wird durch Anwen-

derung des Reduktionsfaktors  $f_{SV,Steig}$  die verkehrsführungsabhängige Grenzkapazität abhängig vom über den Tag einheitlich angesetzten Schwerverkehrsanteil zusätzlich herabgesetzt.

Für den Fall, dass in einer bestehenden Stausituation die vorhandene Verkehrsnachfrage soweit unterhalb der Grenzkapazität liegt, dass innerhalb der betrachteten Stunde ein vollständiger Abbau des Staus erfolgt, wird zunächst die Dauer  $t_{S,E}$  berechnet, die vom Stundenbeginn an bis zur Stauauflösung benötigt wird:

$$t_{S,E} = \frac{M_{S,A}}{Q_{vor} - Q_{grenz}} \quad (E.18)$$

Die danach in den Baustellenbereich einfahrenden Fahrzeuge können den Annäherungsbereich ungehindert passieren. Die in der Stauauflösungsstunde im Stau stehende mittlere Fahrzeuganzahl berechnet sich wie folgt:

$$\bar{M}_S = 0,5 \cdot M_{S,A} \cdot t_{S,E} = \frac{M_{S,A}^2}{2 \cdot |(Q_{vor} - Q_{grenz})|} \quad (E.19)$$

Hierbei finden dieselben Parameter wie in Gl. E.17 Anwendung, wobei auf die Verwendung des Betrags aus Verkehrsstärke und Grenzkapazität geachtet werden muss. Aufbauend auf der mittleren Anzahl an Fahrzeugen in der Warteschlange innerhalb einer untersuchten Stunde wird dann die mittlere Wartezeit pro Fahrzeug im Stau vor dem Einfahren in die Baustelle bestimmt:

$$\bar{t}_W = \frac{\bar{M}_S}{Q_{grenz}} \quad (E.20)$$

mit  $\bar{t}_W$  = mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug in der Staustunde [h/Kfz]

$\bar{M}_S$  = mittlere Anzahl der Kraftfahrzeuge innerhalb einer Staustunde [Kfz]

$Q_{grenz}$  = maximale Verkehrsstärke (entspricht der Grenzkapazität, [Kfz])

Die stundenbezogenen Mittelwerte der Wartezeiten können je nach Analyseziel aufsummiert werden. Die Gesamtwartezeit für eine Stunde ergibt sich, wenn die mittleren Wartezeiten mit den stundenbezogenen Verkehrsbelastungen multipliziert werden:

$$T_W = \bar{t}_W \cdot Q_{vor} \quad (E.21)$$

mit  $T_W$  = Gesamtwartezeit für alle Kraftfahrzeuge in der Stautunde [h]

$\bar{t}_W$  = mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug in [h/Kfz]

$Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsstärke [Kfz]

Ausgehend von der mittleren Anzahl an Fahrzeugen im Stau sowie der Verkehrsdichte kann die mittlere Staulänge berechnet werden:

$$\bar{L}_S = \frac{\bar{M}_S}{d_S} \quad (\text{E.22})$$

mit  $\bar{L}_S$  = mittlere Rückstaulänge [km]

$\bar{M}_S$  = mittlere Anzahl der Kraftfahrzeuge innerhalb einer Stautunde [Kfz]

$d_S$  = Verkehrsdichte im Stau [Kfz/km]

wobei  $d_S$  nach RESSEL (1994) in Abhängigkeit des stündlichen Schwerverkehrsanteils  $SV$  (in Prozent), der Staulänge  $L_{S,A}$  am Stundenanfang und der Art der Verkehrsführung bestimmt wird. Damit ergibt sich für die Verkehrsführungen 3+2 und 5+0:

$$d_S = \begin{cases} 202 - (1,6 \cdot SV), & \text{für } L_{S,A} = 0 \text{ bis } 1000 \text{ m} \\ 237 - (1,3 \cdot SV), & \text{für } L_{S,A} > 1000 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{E.23})$$

Für die Verkehrsführungen 3+1 und 4+0 wird  $d_S$  berechnet mit:

$$d_S = \begin{cases} 160 - (0,8 \cdot SV), & \text{für } L_{S,A} = 0 \text{ bis } 1000 \text{ m} \\ 151 - (0,8 \cdot SV), & \text{für } L_{S,A} > 1000 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{E.24})$$

Die Berechnung für die Verkehrsführungen 2+1 erfolgt auf Grundlage von:

$$d_S = \begin{cases} 129 - (1,2 \cdot SV), & \text{für } L_{S,A} = 0 \text{ bis } 1000 \text{ m} \\ 155 - (0,8 \cdot SV), & \text{für } L_{S,A} > 1000 \text{ m} \end{cases} \quad (\text{E.25})$$

Nicht durch die aufgeführten Verkehrsführungen abgedeckte Fälle werden anhand der genannten Gl. E.23 bis E.25 abgeschätzt.

### E.2.2.2 Verdrängung

Wenn am Anfang einer Staustunde bereits ein Stau besteht, können die in den Stau einfahrenden Fahrzeuge nicht bis zur Abfertigungsstelle vorfahren, sondern werden von dem bestehenden Stau verdrängt. Die Berücksichtigung dieses Verdrängungseffekts wird in BECKMANN und ZACKOR (2001) und HELLMANN et al. (2002) vorgeschlagen. Der grundsätzliche Sachverhalt der Verdrängung ist in Abbildung E.4 visualisiert.



Abbildung E.4: Visualisierung des Verdrängungseffektes und der Verdrängung durch Verdrängung, die zu einer Erhöhung der Staulänge führen

Dadurch, dass sich in einem bestehenden Stau das tatsächliche Stauende verschiebt und die Fahrzeuge, die bei staufreier Fahrt direkt zum Beginn des Baustellenbereichs vorfahren könnten, am Stauende einreihen müssen, findet eine Verdrängung statt. Die betroffenen Fahrzeuge sind in Abbildung E.4 als Fahrzeuge a, b und c gekennzeichnet. Diese verdrängten Fahrzeuge können wiederum Fahrzeuge verdrängen, in dem genannten Beispiel sind dies die Fahrzeuge e und d. Alle verdrängten Fahrzeuge führen zu einer Erhöhung der Staulänge, die mit  $\bar{L}_{S,korr}$  bezeichnet wird. Die Berechnung dieser zusätzlichen Staulänge erfolgt über den Vergleich der Verkehrsdichten in der unbehinderten Verkehrssituation (keine Staubildung) und der Situation mit erfolgter Staubildung.



Der erste Berechnungsschritt baut dabei auf der mit Gl. E.22 berechneten mittleren Rückstaulänge  $\bar{L}_S$  auf:

$$\bar{L}_{S,korr} = \bar{L}_S \cdot \frac{d_{frei}}{d_S - d_{frei}} \quad (\text{E.26})$$

mit  $\bar{L}_{S,korr}$  = zusätzliche mittlere Rückstaulänge durch Verdrängung [km]

$\bar{L}_S$  = mittlere Rückstaulänge [km]

$d_{frei}$  = Verkehrsdichte bei staufreier Fahrt [Kfz/km]

$d_S$  = Verkehrsdichte im Stau [Kfz/km]

Die Berechnung der Effekte von Verdrängung aus Verdrängung erfolgt, indem in weiteren Iterationsschritten die jeweils bestimmte Staulänge  $\bar{L}_{S,korr}$  des vorhergehenden Schrittes mit der mittleren Rückstaulänge  $\bar{L}_S$  addiert wird. Als Ergebnis kann auf Basis der gesamten zusätzlichen Rückstaulänge die Berechnung der verdrängten Fahrzeuge sowie der zusätzlich zu berücksichtigende Zeitverlust dieser Fahrzeuge erfolgen:

$$\bar{M}_{S,korr} = \bar{L}_{S,korr} \cdot d_S \quad (\text{E.27})$$

$$\bar{t}_{W,korr} = \frac{\bar{M}_{S,korr}}{Q_{grenz}} \quad (\text{E.28})$$

mit  $\bar{M}_{S,korr}$  = zusätzliche Anzahl Fahrzeuge im Stau durch Verdrängung [Kfz]

$\bar{t}_{W,korr}$  = zusätzliche mittlere Wartezeit der verdrängten Fahrzeuge [h/Kfz]

$Q_{grenz}$  = maximale Verkehrsstärke (entspricht der Grenzkapazität, [Kfz])

### E.2.2.3 Verkehrsumlagerung

Alle in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Berechnungen beziehen sich auf einen Autobahnabschnitt und berücksichtigen keine Wechselwirkungen im Verkehrsnetz. Allerdings besteht die Möglichkeit, dass Fahrzeuge vor allem bei starken Kapazitätsreduzierungen Alternativrouten wählen, was als Verkehrsumlagerung bezeichnet wird. Aktuelle Untersuchungen zu baustellenbedingten Verkehrsumlagerungen in LAFFONT (2012) zeigen, dass für kapazitätsreduzierte Autobahnabschnitte die tägliche Verlagerung unter 1 %

liegt. Zu Spitzenstunden wird eine Umlagerung von 2 % bis 5 % festgestellt. Insgesamt werden Umlagerungseffekte für die gesamtwirtschaftliche Analyse als nur in geringen Maße ergebnisrelevant eingestuft.

Dem Ergebnis in LAFFONT (2012) folgend, dass nur bei größeren Kapazitätseinbußen Umlagerungseffekte auftreten, wird der Ansatz von HELLMANN et al. (2008) übernommen, der unter einer Staulänge von 3 km keine Verkehrsumlagerungen berücksichtigt. In Abhängigkeit der Gesamtstaulänge wird der folgende Reduktionsfaktor berechnet:

$$r_{Um} = \begin{cases} 0 & \text{für } (\bar{L}_S + \bar{L}_{korr}) < 3 \text{ km} \\ \frac{1}{75} \cdot (\bar{L}_S + \bar{L}_{korr}) & \text{für } 3 \text{ km} \leq (\bar{L}_S + \bar{L}_{korr}) \leq 30 \text{ km} \\ 0,4 & \text{für } (\bar{L}_S + \bar{L}_{korr}) > 30 \text{ km} \end{cases} \quad (\text{E.29})$$

mit  $r_{Um}$  = Reduktionsfaktor zur Berücksichtigung von Verkehrsumlagerungen durch Abminderung der Verkehrsnachfrage [-]

$\bar{L}_S$  = mittlere Rückstaulänge [km]

$\bar{L}_{S,korr}$  = zusätzliche mittlere Rückstaulänge durch Verdrängung [km]

Nach Gl. E.29 wird bei Staulängen ab 3 km die Verkehrsnachfrage um den Reduktionsfaktor  $r_{Um}$  abgemindert, so dass weniger Fahrzeuge in den Engpass einfließen. Es wird davon ausgegangen, dass die tatsächlich entstehenden Verkehrsumlagerungen unterschätzt werden. Gleichzeitig findet *keine* Berechnung der bei Alternativrouten durch längere Fahrwege entstehenden zusätzlichen externen Effekte statt, so dass angenommen wird, dass die Gesamtauswirkungen in grober Näherung abgebildet werden.

### E.2.3 Berechnung Zeitverluste

Mit den in den vorherigen Abschnitten genannten Berechnungsgrundlagen können alle Geschwindigkeiten, Fahrtauern und ggf. Wartezeiten im Annäherungs- und Baustellenbereich berechnet werden. Für die Bestimmung der baustelleninduzierten Fahrtzeitverluste muss wie beschrieben zusätzlich die Geschwindigkeit und damit Fahrtdauer für den Vergleichsfall „freie Strecke“ bestimmt werden, um anschließend die durch die Baustelle entstehenden Differenzen berechnen zu können. Wenn die Grenzkapazität überschritten wird, ändert sich i. d. R. die Staulänge stündlich, so dass für den Fall mit und ohne Verkehrsstau jeweils unterschiedliche Algorithmen angewendet werden müssen. Da

PKW und der Schwerverkehr sowohl unterschiedliche Geschwindigkeiten fahren als auch mit unterschiedlichen Monetarisierungsansätzen für Zeitkosten versehen sind, werden die Zeitverluste jeweils für beide Fahrzeugarten getrennt berechnet, im Folgenden wird diese Unterscheidung allerdings nicht ausgewiesen.

Für den Fall mit Stau ergibt sich der Zeitverlust durch das Durchfahren der Stau- und Baustrecke im Vergleich zur freien Strecke in einer Betrachtungsstunde zu:

$$\Delta T_{S+B} = \underbrace{Q_{vor} \cdot (\bar{t}_W + \bar{t}_{W,korr} - \frac{\bar{L}_S + \bar{L}_{S,korr}}{v_{frei}})}_{\text{Stau-strecke}} + \underbrace{Q_{vor} \cdot (\frac{L_B}{v_{B,S}} - \frac{L_B}{v_{frei}})}_{\text{Baustrecke}} \quad (\text{E.30})$$

mit  $\Delta T_{S+B}$  = Zeitverlust Stau- und Baustrecke im Stauffall [h]

$Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsstärke, Unterscheidung in PKW / SV [Kfz]

$\bar{t}_W$  = mittlere Wartezeit pro Kraftfahrzeug in der Staustunde [h/Kfz]

$\bar{t}_{W,korr}$  = zusätzliche mittlere Wartezeit der verdrängten Fahrzeuge [h/Kfz]

$\bar{L}_S$  = mittlere Rückstaulänge [km]

$\bar{L}_{S,korr}$  = zusätzliche mittlere Rückstaulänge durch Verdrängung [km]

$v_{frei}$  = Geschwindigkeit freie Strecke, Unterscheidung in PKW / SV [km/h]

$v_{B,S}$  = Geschwindigkeit in der Baustrecke bei Stau im Annäherungsbereich

$v = 50$  km/h für PKW und SV, vergleiche Abschnitt E.2.1

$L_B$  = Baustellenlänge [km]

$t_{S,frei}$  = Zeit zum Durchfahren der Stau-strecke ohne Baustelle [h]

$t_{B,frei}$  = Zeit zum Durchfahren der Baustrecke ohne Baustelle [h]

Wenn kein Verkehrsstau auftritt, entstehen Zeitverluste durch das Durchfahren des Annäherungs- und Baustellenbereichs mit im Vergleich zur freien Strecke geringeren Geschwindigkeiten. Der sich ergebende Zeitverlust in einer betrachteten Stunde ist:

$$\Delta T_{An+B} = \underbrace{Q_{vor} \cdot (\frac{L_{An}}{v_{100}} - \frac{L_{An}}{v_{frei}})}_{\text{Annäherungsstrecke}} + \underbrace{Q_{vor} \cdot (\frac{L_B}{v_{80}} - \frac{L_B}{v_{frei}})}_{\text{Baustrecke}} \quad (\text{E.31})$$

- mit  $\Delta T_{An+B}$  = Zeitverlust Annäherungs- und Baustrecke ohne Stau [h]  
 $Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsstärke, Unterscheidung in PKW / SV [Kfz]  
 $L_{An}$  = Länge des Annäherungsbereichs [km]  
 $v_{100}$  = Geschwindigkeit im Annäherungsbereich für  $v_{zul} = 100$  km/h,  
 Unterscheidung in PKW / SV  
 $v_{frei}$  = Geschwindigkeit freie Strecke, Unterscheidung PKW / SV [km/h]  
 $L_B$  = Baustellenlänge [km]  
 $v_{80}$  = Geschwindigkeit im Baustellenbereich für  $v_{zul} = 80$  km/h,  
 Unterscheidung in PKW / SV  
 $t_{An,frei}$  = Zeit zum Durchfahren der Annäherungsstrecke ohne Baustelle [h]  
 $t_{B,frei}$  = Zeit zum Durchfahren der Baustrecke ohne Baustelle [h]

In beiden Fällen werden geringe Zeitverluste, die in dem Beschleunigungsbereich hinter der Baustelle entstehen, im Rahmen der Berechnung der Zeitverluste vernachlässigt. Gleichzeitig wird davon ausgegangen, dass bei der Einfahrt in den Annäherungsbereich die zulässige Höchstgeschwindigkeit unmittelbar eingehalten wird. Zeitunterschiede aufgrund eines verzögerten Abbremsens werden vernachlässigt.

Wie beschrieben, werden die Zeitverluste für jede Stunde berechnet, in der eine Baustellenführung eingerichtet ist. Da die bauteilspezifischen Baumaßnahmen in Anhang D.1 bis D.3 in Wochen ausgewiesen werden, müssen zur Ermittlung der Zeitverluste der gesamten Bauzeit die Stundenergebnisse aufsummiert werden. Da eine separate Analyse der Fahrt- und Gegenrichtung stattfindet, müssen auch diese Ergebnisse summiert werden, so dass sich der Bauzeitgesamtzeitverlust ergibt zu:

$$\Delta T_{BZ} = \sum_{BW=1}^{BW_{ges}} \sum_{t=1}^7 \sum_{h=1}^{24} \sum_{R=1}^2 \Delta T_{BW,t,h,R} \quad (E.32)$$

mit  $\Delta T_{BZ}$  = Zeitverluste in der gesamten Bauzeit [h]

$BW_{ges}$  = Gesamtanzahl der Bauwochen

$BW$  = Bauwoche

$t$  = Wochentag

$h$  = Tagesstunde

$R$  = Richtungsfahrbahn (Fahrt- und Gegenrichtung)

$\Delta T_{BW,t,h,R}$  = stundengenaue Gesamtzeitverluste [h] nach Gl. E.30 bzw. Gl. E.31

Diese Zeitverluste in der gesamten Bauzeit werden für PKW und den Schwerverkehr getrennt berechnet. Durch Multiplikation der Verlustzeiten mit dem jeweiligen Monetarisierungsansatz (siehe Abschnitt 3.3.2) können abschließend die externen Verspätungskosten entstehend durch Kapazitätsreduzierungen bestimmt werden.

#### E.2.4 Abfragen Handbuch Emissionsfaktoren

In Ergänzung zu den Zeitverlusten werden auch weitere Verkehrsauswirkungen in die Analysen integriert. Die Eingangsparameter basieren dabei auf für die deutsche Fahrzeugflotte repräsentativen Erhebungen des Kraftstoffverbrauchs und der damit zusammen anfallenden Schadstoffemissionen, die im Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs – HBEFA (2010) erfasst sind. Alle verwendeten Daten stammen aus der Version 3.1 und sind auf das Jahr 2010 bezogen.

Die Angaben im Handbuch für Emissionsfaktoren basieren auf Messungen von realen Verkehrssituationen und einem Modell zur Simulation der Emissionen. Damit lassen sich Ergebnisse gruppiert nach verschiedenen Parametern ausgeben, beispielsweise nach Schadstoffen, Euro-Klassen oder Fahrzeugkategorien (PKW, schwere Nutzfahrzeuge, Reisebusse etc.). Eine Darstellung des geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoffverbrauchs von vier verschiedenen Euro-Klassen ist in Abbildung E.5 für dieselbetriebene schwere LKW (links) und benzinbetriebene PKW (rechts) enthalten. Auf dieser Basis lassen sich für verschiedene Verkehrssituationen die zugehörigen Verbräuche bestimmen.

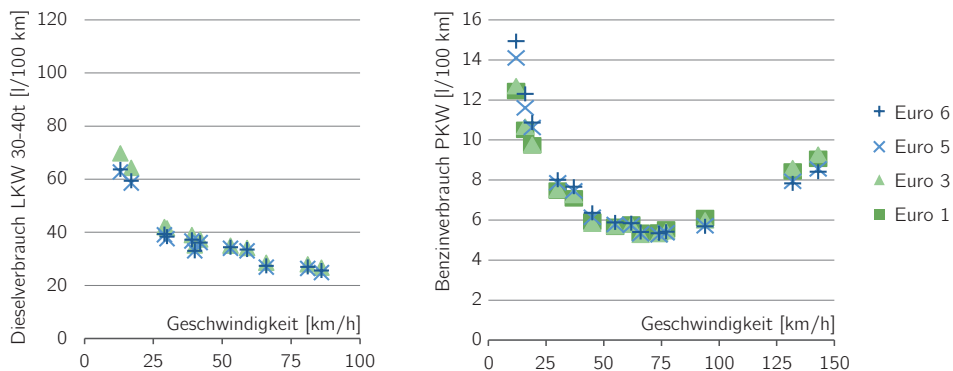


Abbildung E.5: Kraftstoffverbräuche in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeiten für dieselbetriebene LKW mit Anhänger und einem Gesamtgewicht von 30-40 t (links) sowie für benzinbetriebene PKW (rechts), Daten aus Hausberger et al. (2009)

In dieser Arbeit werden aus HBEFA (2010) abgefragte, gewichtete Emissionsfaktoren verwendet, in denen unterschiedliche Fahrzeugklassen bereits entsprechend ihrer Fahrleistung verrechnet sind. Damit wird eine für Deutschland repräsentative Fahrzeugflotte abgebildet. Der jahresabhängige relative Anteil der PKW-Euro-Klassen an der Fahrzeugflotte auf ist in Abbildung E.6 dargestellt. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise die in Abbildung E.5 dargestellten Verbräuche entsprechend ihres Anteils an der Fahrzeugflotte gewichten.

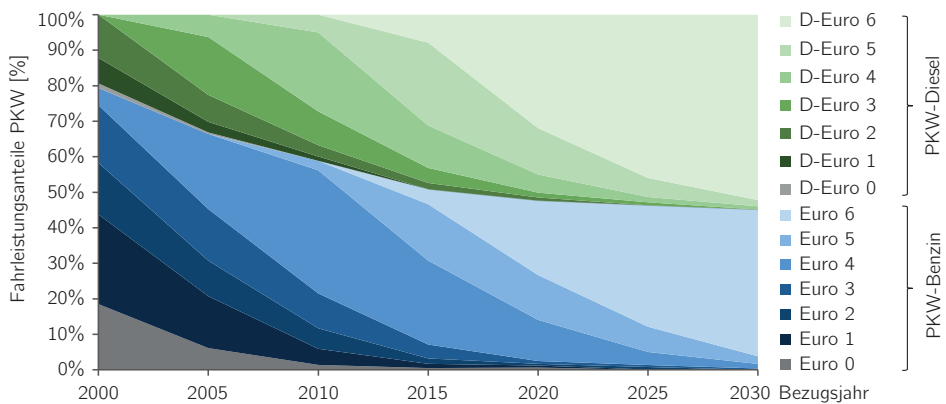


Abbildung E.6: PKW-Fahrzeugflotte in verschiedenen Bezugsjahren in Abhängigkeit der Euro-Klassen unterteilt in diesel- und benzinbetriebene PKW, Daten aus HBEFA (2010)

Die Abfragen aus dem HBEFA werden so gestaltet, dass die festgelegten Autobahntypen in Abschnitt 5.1.3 berechnet werden können. Eine Zusammenstellung der definierten Verkehrssituationen als Basis für die Abfragen ist in Tabelle E.10 zu finden.

Tabelle E.10: Definierte Parameter zur Beschreibung der Verkehrssituation für die durchgeführten Abfragen aus dem Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs

Verkehrssituation	Abfrage 1	Abfrage 2	Abfrage 3	Abfrage 4	Abfrage 5
Straßenklasse	Autobahn (AB)	Autobahn (AB-Nat.)	Autobahn (AB-Nat.)	Autobahn (AB-Nat.)	Fernstraße (FernStr-Nat.)
Gebiet	ländlich	Agglomeration	Agglomeration	Agglomeration	Agglomeration
Geschwindigkeit	unbegrenzt	Tempolimit 130 km/h	Tempolimit 80 km/h	5-10 km/h (Stausituation)	Tempolimit 100 km/h
Verkehrsfluss	dichte Fahrt	dichte Fahrt	dichte Fahrt	Stop&Go	flüssig
Steigung	0%	0%	0%	0%	0%
Bezugsjahr	2010/2030	2010/2030	2010/2030	2010/2030	2010/2030
Verkehrsflotte	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland	Deutschland

Als Ergebnis werden 14 Komponenten jeweils für PKW und Schwerverkehr ausgegeben, die als Eingangswerte für die weiteren Berechnungen dienen: Kraftstoffverbrauch, Kohlenmonoxid  $CO$ , Kohlenwasserstoffkomponenten ( $H C$ -Komponenten: Methan  $CH_4$ , Nicht Methan Kohlenwasserstoffe  $NMHC$  und  $Benzol$ ), Stickstoffoxide  $NO_x$ , Stickstoffdioxid  $NO_2$ , Feinstäube (Particulate Matter,  $PM$  und Particel Number,  $PN$ ), Kohlendioxid  $CO_2$ , Ammoniak  $NH_3$ , Distickstoffmonoxid  $N_2O$  und Schwefeldioxid  $SO_2$ .

### E.2.5 Berechnung Kraftstoffverbrauch

Auf Grundlage der Geschwindigkeitsberechnungen getrennt für PKW und SV sowie der bekannten Flottenzusammensetzung der PKW hinsichtlich benzin- und dieselbetriebenen Fahrzeugen lassen sich die Kraftstoffverbräuche getrennt nach Diesel und Benzin bestimmen. Dazu werden die geschwindigkeitsbezogenen Abfrageergebnisse aus dem HBEFA (2010) verwendet, um die auf einen Kilometer bezogenen Kraftstoffverbräuche für die stundengenau ermittelte Durchschnittsgeschwindigkeit zu berechnen.

Die Abfrageergebnisse aus dem HBEFA (2010) erzeugen wie in Abbildung E.7 dargestellt vier Stützstellen der Verbräuche von PKW. Bei freier und nicht geschwindigkeitsbegrenzter Fahrt wird dabei von einer Geschwindigkeit von 143 km/h ausgegangen. Zur Ermittlung der genauen Kraftstoffverbräuche der sich im Stundenmittel einstellenden Geschwindigkeiten wird eine lineare Interpolation verwendet. Die Abweichungen zum tatsächlichen Verlauf werden vernachlässigt.

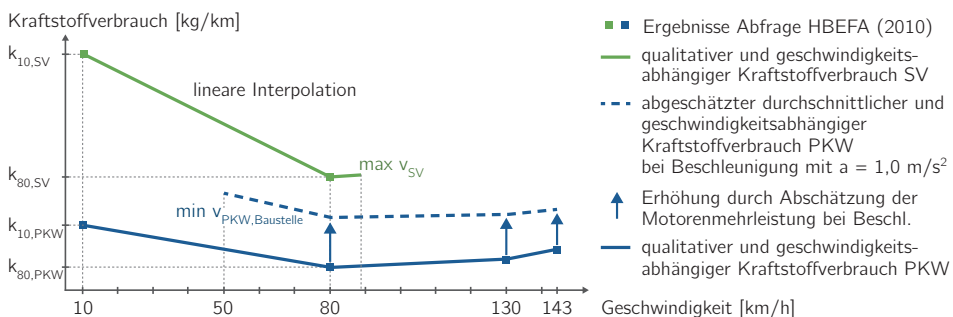


Abbildung E.7: Qualitative Darstellung der zur Berechnung der Kraftstoffverbräuche verwendeten Kraftstoffverbrauchs-funktionen auf Basis der Daten aus HBEFA (2010)

Die Ergebnisse durchgeführter Vergleichsrechnungen zeigen, dass – im Gegensatz zur Berechnung der Gesamtzeitverluste – die Vernachlässigung der Kraftstoffverbräuche in

der Beschleunigungsphase hinter der Baustelle zur einer deutlichen Unterschätzung des Gesamtergebnisses führen. Daher findet eine geschwindigkeitsabhängige Erhöhung der Kraftstoffverbräuche durch Abschätzung der erhöhten Motorarbeit für den Beschleunigungsfall statt. Die Gl. E.33 zur Berechnung der Beschleunigungsarbeit baut dabei auf REXEIS et al. (2005) auf, die dasselbe Modell wie das HBEFA (2010) verwenden. Es wird davon ausgegangen, dass alle weiteren Werte zur Berechnung der Motorarbeit (Roll- und Luftwiderstand, Längsneigung, Übertragungsverluste und Hilfsarbeit) bereits durch die Kraftstoffverbräuche der konstanten Fahrt abgebildet sind:

$$P_a = (m_{Fz} \cdot \Lambda_0 + m_L) \cdot a \cdot v \quad (\text{E.33})$$

mit  $P_a$  = Beschleunigungsarbeit [W]

$m_{Fz}$  = Masse des Fahrzeugs [kg]

$m_L$  = Masse der Ladung [kg]

$\Lambda_0$  = Rotationsmassenaufschlag [-]

$a$  = Fahrzeugbeschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]

$v$  = Fahrzeuggeschwindigkeit [m/s]

Da hier die Fahrzeugbeschleunigung  $a = 1 \text{ m/s}^2$  auf Basis von TREIBER et al. (2008) als Durchschnittswert festgelegt wird, kann  $\Lambda_0 = 1$  gesetzt werden (REXEIS et al. 2005). Als durchschnittliche Masse des Fahrzeugs und der Ladung wird für PKW der Wert 1717 kg aufbauend auf HAUSBERGER et al. (2009) angesetzt. Ausgehend von verschiedenen Ausgangsgeschwindigkeiten kann dann die Zeit und damit auf Basis von Gl. E.33 auch die Motorbeschleunigungsarbeit berechnet werden, die zum Durchfahren von 1 km unter konstanter Beschleunigung benötigt wird. Diese Werte werden im Anschluss mit den Motorarbeiten bei Fahrt konstanter Geschwindigkeit (HAUSBERGER et al. 2009) verglichen und ein Erhöhungsfaktor bestimmt, der wie in Abbildung E.7 gezeigt auf die Stützstellen der Grundverbräuche angewendet wird. Für verschiedene Ausgangsgeschwindigkeiten ergeben sich dabei unterschiedliche Erhöhungsfaktoren. Unter Anwendung der gestrichelten Linie in Abbildung E.7 kann die Berechnung des bezogenen Kraftstoffverbrauchs  $k_{Be}$  im Beschleunigungsbereich erfolgen.

Die oben beschriebenen Berechnungen der Beschleunigungsverbräuche nach dem Baustellenbereich werden nur für PKW berechnet. Entsprechende Verbräuche von LKW werden nicht berücksichtigt, da im Fall einer zulässigen Geschwindigkeit im Baustellenbereich von  $v_{zul} = 80 \text{ km/h}$  kaum Beschleunigungsarbeit erforderlich ist. Nur im Fall eines



Staus vor der Baustelle und der sich damit ergebenden Geschwindigkeit von  $v = 50 \text{ km/h}$  im Baustellenbereich ergäben sich Beschleunigungsarbeiten, die aber vernachlässigt werden.

Aufbauend auf den berechneten geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoffverbräuchen kann für die unterschiedlichen Baustellenbereiche der Gesamtkraftstoffverbrauch einzeln bestimmt werden. Dabei muss wiederum zwischen einer Stausituation nach Gl. E.34 sowie einer staufreien Baustelle nach Gl. E.35 unterschieden werden:

$$\begin{aligned} \Delta K_{S+B+Be} = & \underbrace{Q_{vor} \cdot (\bar{L}_S + \bar{L}_{S,korr}) \cdot (k_{v=10} - k_{v=frei})}_{\text{Staustricke}} \\ & + \underbrace{Q_{vor} \cdot L_B \cdot (k_{v=50} - k_{v=frei})}_{\text{Baustrecke}} + \underbrace{Q_{vor} \cdot L_{Be} \cdot (k_{Be} - k_{v=frei})}_{\text{Beschleunigungsstrecke}} \end{aligned} \quad (\text{E.34})$$

$$\begin{aligned} \Delta K_{An+B+Be} = & \underbrace{Q_{vor} \cdot L_{An} \cdot (k_{vzul=100} - k_{v=frei})}_{\text{Annäherungsstrecke}} \\ & + \underbrace{Q_{vor} \cdot L_B \cdot (k_{vzul=80} - k_{v=frei})}_{\text{Baustrecke}} + \underbrace{Q_{vor} \cdot L_{Be} \cdot (k_{Be} - k_{v=frei})}_{\text{Beschleunigungsstrecke}} \end{aligned} \quad (\text{E.35})$$

mit  $\Delta K_{S+B+Be}$  = zusätzlicher Gesamtkraftstoffverbrauch im Staufall [kg]

$\Delta K_{An+B+Be}$  = zusätzlicher Gesamtkraftstoffverbrauch im staufreien Fall [kg]

$Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsstärke, Unterscheidung in PKW / SV [Kfz]

$\bar{L}_S$  = mittlere Rückstaulänge [km]

$\bar{L}_{S,korr}$  = zusätzliche mittlere Rückstaulänge durch Verdrängung [km]

$k_v$  = bezogener Kraftstoffverbrauch bei der zugehörigen Geschwindigkeit  $v$  ermittelt nach Abbildung E.7 für PKW und SV, Geschwindigkeitsbestimmung nach Gl. E.10 bis Gl. E.16 [kg/km]

$k_{Be}$  = bezogener Kraftstoffverbrauch im Beschleunigungsbereich, nur für PKW berechnet [kg/km]

$L_{An}$  = Länge des Annäherungsbereichs [km]

$L_B$  = Baustellenlänge [km]

$L_{Be}$  = benötigte Distanz zum Beschleunigen [km]

Alle vorgestellten Ergebnisse liegen für jede Stunde während der Bauzeit und für Fahrt- und Gegenrichtung getrennt vor. Die durch Baustellen induzierten, zusätzlichen Kraftstoffverbräuche in der gesamten Bauzeit lassen sich wiederum durch Aufsummieren analog zu den Zeitverlusten in der gesamten Bauzeit in Gl. E.32 berechnen.

### E.2.6 Berechnung Emissionen

Da sowohl die geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoffverbräuche als auch die geschwindigkeitsabhängigen Emissionen auf den Abfragen aus dem HBEFA basieren, ergibt sich für Emissionen ein zu den Berechnungen der Kraftstoffverbräuche äquivalenter Berechnungsablauf. Allerdings können nur die Kategorien, für die in Abschnitt 3.3.4 hergeleitete Monetarisierungsansätze existieren, für die Bestimmung der externen Umweltkosten herangezogen werden. Der Umgang mit den im HBEFA ausgewiesenen Schadstoffkategorien wird im Folgenden kurz erläutert.

$NO_2$  ist ein Bestandteil des  $NO_x$  (HBEFA 2010) und wird daher nicht separat bewertet. Nicht Methan Kohlenwasserstoffe (Non Methane Hydrocarbons, *NMHC*) werden mit dem Monetarisierungsansatz von flüchtigen organischen Nicht Methan Verbindungen (Non Methane Volatile Organic Compounds, *NMVOC*) bewertet, da *NMHC* eine Teilgruppe der *NMVOC* darstellen (MÖLLER 2003). Im HBEFA (2010) wird *Benzol* als Teil der *NMHC* erfasst, daher wird Benzol nicht einzeln in die Auswertung miteinbezogen, um Doppelwertungen zu vermeiden. Kohlenmonoxid *CO* tritt heutzutage im Bereich der Verkehrsemissionen i. d. R. nicht mehr in kritischen Konzentrationen auf (IFEU 2011) und hierzu werden auch keine Monetarisierungsfaktoren ausgewiesen, so dass diese Schadstoffemission ebenfalls nicht bewertet wird.

Der in Abbildung E.7 qualitativ beschriebene, geschwindigkeitsabhängige Kraftstoffverbrauchsverlauf mit einem Minimum bei ca. 80 km/h ergibt sich auch für  $CO_2$ -Emissionen (HAUSBERGER et al. 2009), für andere Emissionsarten stellen sich unterschiedliche Verläufe ein, so dass keine Verallgemeinerung der geschwindigkeitsabhängigen Kurvenverläufe auf Basis einer Emissionskomponente stattfinden kann. Daher wird jede Emissionsart separat berechnet. Alle im vorherigen Abschnitt beschriebenen Grundlagen zu der geschwindigkeitsabhängigen Kraftstoffverbrauchsermittlung gelten analog für die Ermittlung der Emissionen.

In der Ökobilanzierung werden bei den untersuchten Wirkungskategorien nur die Emissionen aus dem HBEFA integriert, die einen Beitrag zu der jeweiligen Wirkungskategorie

leisten. Dabei wird – wie oben für die Monetarisierungsansätze beschrieben – darauf geachtet, dass keine Doppelwertungen erfolgen.

### E.2.7 Integrierte Unsicherheiten

Alle in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Eingangsparameter sind feste Eingangsgrößen, die auf Grundlage der definierten Randbedingungen der vier untersuchten Autobahntypen bestimmt werden. Allerdings wird insbesondere die stündliche Verkehrsnachfrage immer einer Streuung unterliegen, die vor allem bei Situationen, in denen die Verkehrsnachfrage nahe der Grenzkapazität liegt, eine maßgebende Auswirkung auf das Ergebnis haben kann. Diese Auswirkung zeigt sich dann in einer Stauentstehung. In OBER-SUNDERMEIER (2003) wird daher empfohlen, eine stochastische Schwankung der stündlichen Verkehrsnachfragewerte zu untersuchen und mit Hilfe einer Normalverteilung und einem Variationskoeffizienten zwischen 0,05 und 0,1 abzubilden. Der Variationskoeffizient beschreibt dabei den Quotienten aus Standardabweichung dividiert durch den Erwartungswert. Als Erwartungswert wird der berechnete stündliche Wert der typisierten Verkehrsganglinien verwendet.

Des Weiteren wird die Streuung der Verkehrsemissionen und Treibstoffverbräuche in die probabilistischen Berechnungen miteinbezogen. Da bei baustellenbedingten Kapazitätsreduzierungen sowohl im Vergleichsfall als auch im Baustellenfall dieselben Fahrzeuge den Engpass passieren, liegt die Ursache der Streuungen der Verkehrsemissionen ausschließlich im geschwindigkeitsabhängigen Verlauf der Emissionskurven. Daher wird ein im Vergleich zu den kilometerbezogenen Streuungen im nächsten Abschnitt niedriger Variationskoeffizient von 0,05 verwendet, für Emissionen entstehend im Beschleunigungsbereich ein Variationskoeffizient von 0,1. Dieser wird aufgrund der Vielzahl der unsicheren Eingangsparameter in Gl. E.33 höher angesetzt. Alle einbezogenen Unsicherheiten sind in Tabelle E.11 zusammengefasst.

Tabelle E.11: Berücksichtigte Unsicherheiten bei baustellenbedingten Kapazitätsreduzierungen und verwendete Variationskoeffizienten

Parameter	Verteilung	Verwendung	Variationskoeffizient
Tagesganglinien	standardnormal	stündliche Verkehrsnachfrage PKW / SV	0,05 / 0,05
Emissionen Baustelle	standardnormal	stündliche Emissionen PKW / SV	0,05 / 0,05
Emissionen Beschleunig.	standardnormal	stündliche Emissionen PKW	0,1

## E.3 Umleitungen

Umleitungen sind die Folge von Teil- oder Vollsperrungen von Straßen. Da als Resultat Mehrkilometer anfallen, kann die Berechnung nicht auf Grundlage der in den vorherigen Abschnitten vorgestellten Berechnungsmethode basierend auf einer Herabsetzung der Grenzkapazität erfolgen. Daher werden für alle Autobahntypen immer fallspezifische Umleitungslängen definiert, die als mittlere Werte verschiedener Umleitungsrouten zu verstehen sind. Da im Normalfall mehrere Umfahrungsmöglichkeiten existieren, wird davon ausgegangen, dass auf den Umleitungen keine Überschreitung der Grenzkapazität stattfindet und somit keine Staus entstehen.

Auswirkungen von Umleitungen müssen nur bei den Autobahnüberführungen (A-Referenzbauwerke) berechnet werden. Für den oben liegenden Sachverhalt (Bundes- oder Landesstraße) spielen Umleitungen dabei eine deutlich größere Rolle als für den unten liegenden Sachverhalt (Autobahn), bei dem lediglich für die Maßnahme des Abrisses eine Vollsperrung für ein Wochenende erfolgt. Für die B- und C-Referenzbrücken wird davon ausgegangen, dass der Verkehr immer über ein Bestandsbauwerk bzw. über einen Überbau geführt werden kann, so dass Umfahrungen vermieden werden.

### E.3.1 Berechnung Zeitverluste

Die Berechnung der Zeitverluste erfolgt stundenbasiert getrennt für die Fahrt- und Gegenrichtung. Wie in Abschnitt E.1.2 beschrieben, wird zunächst die stündliche Verkehrsnachfrage getrennt für PKW und Schwerverkehr ermittelt, wobei typisierte Jahres-, Wochen- und Tagesganglinien repräsentativ für Bundes- bzw. Landesstraßen nach PINKOFSKY (2006) Anwendung finden. Auf dieser Basis kann die Berechnung der für das Durchfahren der Umleitungsstrecke zusätzlichen Zeit nach Gl. E.36 erfolgen, wobei die Zeiten aller in einer Betrachtungsstunde die Umleitung befahrenden Fahrzeuge erfasst werden:

$$T_{Um} = Q_{vor} \cdot \frac{L_{Um}}{\bar{v}_{Um}} \quad (\text{E.36})$$

- mit  $T_{Um}$  = zusätzliche Zeit zum Durchfahren der Umleitungsstrecke [h]  
 $Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsnachfrage, getrennt für PKW und SV [Kfz]  
 $L_{Um}$  = Länge der Umleitung [km]  
 $\bar{v}_{Um}$  = mittlere Geschwindigkeit auf der Umleitungsstrecke, getrennt für PKW und SV [km/h]

Die Berechnung von  $T_{Um}$  findet wiederum getrennt für PKW und SV statt, da unterschiedliche Monetarisierungsansätze für die Berechnung der externen Kosten verwendet werden. Als mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge auf der gesamten Umleitungsstrecke wird auf Basis von ZIERKE (2010) der Mittelwert für den Typus einer Fernstraße verwendet, die als zweistreifige Strecke mit einem oder mehreren nicht signalisierten Knotenpunkten charakterisiert werden kann. Für PKW ergibt sich für diesen Straßentyp eine Geschwindigkeit  $\bar{v}_{Um,PKW} = 87,75$  km/h und für Schwerverkehr  $\bar{v}_{Um,PKW} = 70$  km/h. Diese Vereinfachung trägt der Tatsache Rechnung, dass die tatsächlichen Geschwindigkeiten stark von dem Regelquerschnitt, der Kurvigkeit sowie der Längsneigung der Straßenzüge abhängig und nur fallspezifisch bestimmbar sind. Darüber hinaus ist nicht bekannt, ob auf der Strecke längere Geschwindigkeitsbegrenzungen auf 80 km/h vorliegen. Daher wird an dieser Stelle auf durchschnittliche, empirisch gewonnene Werte zurückgegriffen.

### E.3.2 Berechnung Kraftstoffverbrauch und Emissionen

Kraftstoffverbrauchs- und Emissionsberechnungen von gefahrenen Mehrkilometern erfolgen auf Basis von geschwindigkeitsabhängigen Kennlinien für Fernstraßen. Dabei werden die Verbräuche und Emissionen für die im letzten Abschnitt definierten mittleren Geschwindigkeiten bestimmt, für Kraftstoffe zusätzlich getrennt nach Benzin- und Dieselverbräuchen. Die Berechnung erfolgt auf Basis von Gl. E.37:

$$E_{Um,S} = Q_{vor} \cdot L_{Um} \cdot e_{\bar{v},Um} \quad (\text{E.37})$$

- mit  $E_{Um,S}$  = Gesamtkraftstoffverbräuche bzw. Gesamtemissionen unterteilt nach Schadstoffgruppen  $S$  beim Durchfahren der Umleitungsstrecke [l, kg]  
 $Q_{vor}$  = vorhandene Verkehrsnachfrage, getrennt für PKW und SV [Kfz]  
 $L_{Um}$  = Länge der Umleitung [km]  
 $e_v$  = bezogene Kraftstoffverbräuche bzw. Emissionen bei der jeweiligen mittleren Geschwindigkeit  $\bar{v}_{Um}$  auf der Umleitungsstrecke, die für PKW und SV getrennt angesetzt wird [l/km, kg/km]

Die Ergebnisse werden wiederum mit den definierten Monetarisierungsfaktoren multipliziert, um externe Kosten zu berechnen. Die externen Gesamtkosten werden bestimmt, indem die stundenbasierten Ergebnisse analog zu Gl. E.32 aufsummiert werden. Auf diese

Weise können auch die Effekte berechnet werden, die durch Sperrung der unten liegenden Autobahn für ein Wochenende entstehenden, indem nur für die Tage Samstag und Sonntag die stundenbasierten Ergebnisse summiert werden.

### E.3.3 Integrierte Unsicherheiten

Auch für den Analysefall der Umleitungen werden in die probabilistischen Berechnungen Streuungen der Eingangsparameter integriert. Die Streuung der Verkehrsnachfrage wird dabei auf Grundlage der Wochenganglinien mit einem Variationskoeffizienten von 0,03 angesetzt, da für Umleitungen davon ausgegangen wird, dass keine Kapazitätsüberschreitungen auftreten und damit die stündliche Verteilung keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Des Weiteren wird auf Grundlage der Untersuchungen in ZIERKE (2010) eine Streuung der mittleren Fahrgeschwindigkeit auf der Umleitungsstrecke angesetzt. Ausgehend von einer Geschwindigkeit für PKW  $v_{85} = 96$  km/h, die nur von 15 % der Fahrzeuge überschritten wird, und einer Geschwindigkeit  $v_{15} = 79,5$  km/h, die von 15 % der Fahrzeuge unterschritten wird, lässt sich der Mittelwert sowie das Streuband berechnen, wenn von einer Normalverteilung der Geschwindigkeiten ausgegangen wird. Daraus ergibt sich einmal der oben genannte Mittelwert  $\bar{v}_{Um,PKW} = 87,75$  km/h sowie ein Variationskoeffizient von 0,094, der auch für den Schwerverkehr angesetzt wird.

Des Weiteren werden auch Streuungen der Treibstoffverbräuche und Emissionen berücksichtigt, wobei im Betrachtungsfall der Umleitungen die Gesamtunsicherheiten des Schadstoffausstoßes integriert werden müssen. Dies geschieht auf Basis von HAUSBERGER et al. (2009), wobei sowohl Mess- als auch Modellunsicherheiten in den in Tabelle E.12 angegebenen Werten enthalten sind. Nicht angegebene Streuungen werden abgeschätzt.

Tabelle E.12: Verwendete Variationskoeffizienten für Standardnormalverteilungen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei Umleitungen, alle Angaben für Treibstoffverbräuche und Emissionen stammen aus Hausberger et al. (2009)

Verkehrsart	Treibstoff*	Emission No <sub>x</sub>	Emission HC	Emission CO	Emission PM	weitere Emissionen***	Geschwindigkeit	WGL
Schwerverkehr, EURO 4 / 5	0,04	0,36	0,51	0,76	0,45	0,1	0,09	0,03
EURO 4, Benzin	0,04	0,88	0,41	0,45	-	0,1	-	-
EURO 4, Diesel	0,04	0,14	0,36	-	0,35	0,1	-	-
Flotte PKW**	0,04	0,64	0,39	0,45	0,35	0,1	0,09	0,03

\* Benzinverbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen korrelieren stark, daher Verwendung dieser Werte auch für CO<sub>2</sub>

\*\* gewichtet auf Grundlage der Flottenzusammensetzung 2010, \*\*\* geschätzt

## Anhang F: Absolute Ergebnisse Ökobilanzierung

### Vorbemerkungen

Die absoluten Ergebnisse der ökobilanziellen Analysen werden im Folgenden zusammengefasst und vervollständigen die prozentual dargestellten Ergebnisse aus Kapitel 6. Die absoluten Auswirkungen in den einzelnen Wirkungskategorien ermöglichen den Vergleich mit anderen Studien. Des Weiteren können sie zur Definition von Benchmarks verwendet werden.

Im Folgenden werden zunächst die externen Umwelteffekte in den fünf definierten Wirkungskategorien sowie in der Kategorie der Primärenergie-Ressourceninanspruchnahme ausgewiesen. Die Ökobilanzergebnisse der Brückenkonstruktionen werden separat und unterteilt in die Gruppen Unterbau, Überbau und Ausbau aufgeführt. Als funktionales Äquivalent (definiert in der ISO 21931-1 (2010) und analog verwendet beispielsweise in der DIN EN 15978 (2012)) wird einheitlich die Leitsubstanz der jeweiligen Wirkungskategorie bezogen auf die Brückenfläche sowie den Lebenszyklus von 100 Jahren verwendet [kg Leitsubstanz-Äquivalente/( $m^2 \cdot a$ )].

## F.1 Externe Umwelteffekte

### F.1.1 Pendlerautobahn Brücke A1 (Integralbrücke): Ökobilanzielle Ergebnisse der externen Umwelteffekte

Sachverhalt	Phase im Lebenszyklus	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/ m <sup>2</sup> a]
Autobahn unten	Herstellung	43,12	7,74E-06	1,42E-02	2,86E-02	1,09E-01	6,55E+02
Autobahn unten	Nutzung	25,01	4,49E-06	8,39E-03	1,68E-02	6,39E-02	3,80E+02
Autobahn unten	Rückbau	5,83	1,05E-06	2,10E-03	4,08E-03	1,57E-02	8,87E+01
Landesstr. oben	Herstellung	0	0	0	0	0	0
Landesstr. oben	Nutzung	5,18	6,39E-07	2,09E-03	4,68E-03	1,63E-02	7,63E+01
Landesstr. oben	Rückbau	1,01	1,25E-07	4,08E-04	9,14E-04	3,18E-03	1,49E+01
oben + unten	Herstellung	43,12	7,74E-06	1,42E-02	2,86E-02	1,09E-01	6,55E+02
oben + unten	Nutzung	30,18	5,13E-06	1,05E-02	2,15E-02	8,02E-02	4,56E+02
oben + unten	Rückbau	6,84	1,17E-06	2,51E-03	5,00E-03	1,89E-02	1,04E+02
oben + unten	LZ	80,14	1,40E-05	2,72E-02	5,51E-02	2,08E-01	1,21E+03

Brücke A1  Strategie → DTV 100.000

### F.1.2 Grundlastautobahn Brücke A1 (Integralbrücke): Ökobilanzielle Ergebnisse der externen Umwelteffekte


Sachverhalt	Phase im Lebenszyklus	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/ m <sup>2</sup> a]
Autobahn unten	Herstellung	4,80	8,34E-07	-5,53E-04	2,26E-03	7,93E-03	7,05E+01
Autobahn unten	Nutzung	2,62	4,55E-07	-3,02E-04	1,23E-03	4,33E-03	3,85E+01
Autobahn unten	Rückbau	2,21	3,95E-07	6,91E-04	1,57E-03	6,09E-03	3,34E+01
Landesstr. oben	Herstellung	0	0	0	0	0	0
Landesstr. oben	Nutzung	5,11	9,22E-07	2,14E-03	3,97E-03	1,55E-02	7,80E+01
Landesstr. oben	Rückbau	1,00	1,80E-07	4,17E-04	7,74E-04	3,03E-03	1,52E+01
oben + unten	Herstellung	4,80	8,34E-07	-5,53E-04	2,26E-03	7,93E-03	7,05E+01
oben + unten	Nutzung	7,73	1,38E-06	1,84E-03	5,20E-03	1,99E-02	1,16E+02
oben + unten	Rückbau	3,20	5,75E-07	1,11E-03	2,35E-03	9,12E-03	4,86E+01
oben + unten	LZ	15,74	2,79E-06	2,39E-03	9,81E-03	3,69E-02	2,36E+02

Brücke A1  Strategie → DTV 70.000



### F.1.3 Landautobahn Brücke A1 (Integralbrücke): Ökobilanzielle Ergebnisse der externen Umwelteffekte

Sachverhalt	Phase im Lebenszyklus	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/ m <sup>2</sup> a]
Autobahn unten	Herstellung	2,31	3,93E-07	-1,18E-03	-2,38E-04	-1,27E-03	3,34E+01
Autobahn unten	Nutzung	1,26	2,14E-07	-6,45E-04	-1,30E-04	-6,92E-04	1,82E+01
Autobahn unten	Rückbau	1,25	2,23E-07	3,26E-04	7,79E-04	3,02E-03	1,88E+01
Landesstr. oben	Herstellung	0	0	0	0	0	0
Landesstr. oben	Nutzung	5,29	9,55E-07	2,21E-03	4,17E-03	1,63E-02	8,08E+01
Landesstr. oben	Rückbau	1,03	1,86E-07	4,32E-04	8,13E-04	3,17E-03	1,58E+01
oben + unten	Herstellung	2,31	3,93E-07	-1,18E-03	-2,38E-04	-1,27E-03	3,34E+01
oben + unten	Nutzung	6,55	1,17E-06	1,57E-03	4,04E-03	1,56E-02	9,90E+01
oben + unten	Rückbau	2,28	4,09E-07	7,58E-04	1,59E-03	6,20E-03	3,46E+01
oben + unten	LZ	11,14	1,97E-06	1,14E-03	5,39E-03	2,05E-02	1,67E+02

Brücke A1  Strategie → DTV 40.000


### F.1.4 Wochenendautobahn Brücke A1 (Integralbrücke): Ökobilanzielle Ergebnisse der externen Umwelteffekte

Sachverhalt	Phase im Lebenszyklus	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/ m <sup>2</sup> a]
Autobahn unten	Herstellung	1,27	2,16E-07	-1,29E-03	-9,83E-04	-4,01E-03	1,84E+01
Autobahn unten	Nutzung	0,70	1,18E-07	-7,05E-04	-5,36E-04	-2,19E-03	1,00E+01
Autobahn unten	Rückbau	1,49	2,67E-07	4,57E-04	9,71E-04	3,79E-03	2,26E+01
Landesstr. oben	Herstellung	0	0	0	0	0	0
Landesstr. oben	Nutzung	4,35	7,84E-07	1,82E-03	3,31E-03	1,30E-02	6,64E+01
Landesstr. oben	Rückbau	0,85	1,53E-07	3,56E-04	6,47E-04	2,54E-03	1,30E+01
oben + unten	Herstellung	1,27	2,16E-07	-1,29E-03	-9,83E-04	-4,01E-03	1,84E+01
oben + unten	Nutzung	5,04	9,02E-07	1,12E-03	2,78E-03	1,09E-02	7,64E+01
oben + unten	Rückbau	2,34	4,20E-07	8,12E-04	1,62E-03	6,34E-03	3,55E+01
oben + unten	LZ	8,65	1,54E-06	6,39E-04	3,41E-03	1,32E-02	1,30E+02

Brücke A1  Strategie → DTV 30.000

**F.1.5 Grundlastautobahn Brücke A2-V (Zweifeld-Stahlverbundbrücke):  
Ökobilanzielle Ergebnisse der externen Umwelteffekte**

Sachverhalt	Phase im Lebenszyklus	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/ m <sup>2</sup> a]
Autobahn unten	Herstellung	13,54	2,41E-06	2,71E-03	1,02E-02	3,82E-02	2,03E+02
Autobahn unten	Nutzung	2,84	4,93E-07	-3,27E-04	1,34E-03	4,69E-03	4,17E+01
Autobahn unten	Rückbau	2,21	3,95E-07	6,91E-04	1,57E-03	6,09E-03	3,34E+01
Landesstr. oben	Herstellung	0	0	0	0	0	0
Landesstr. oben	Nutzung	5,98	1,08E-06	2,50E-03	4,64E-03	1,82E-02	9,13E+01
Landesstr. oben	Rückbau	1,00	1,80E-07	4,17E-04	7,74E-04	3,03E-03	1,52E+01
oben + unten	Herstellung	13,54	2,41E-06	2,71E-03	1,02E-02	3,82E-02	2,03E+02
oben + unten	Nutzung	8,82	1,57E-06	2,18E-03	5,98E-03	2,29E-02	1,33E+02
oben + unten	Rückbau	3,20	5,75E-07	1,11E-03	2,35E-03	9,12E-03	4,86E+01
oben + unten	LZ	25,57	4,56E-06	6,00E-03	1,85E-02	7,02E-02	3,85E+02

Brücke A2-V  Strategie → DTV 70.000

**F.1.6 Grundlastautobahn Brücke A2-B (Zweifeld-Stahlbetonbrücke):  
Ökobilanzielle Ergebnisse der externen Umwelteffekte**

Sachverhalt	Phase im Lebenszyklus	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/ m <sup>2</sup> a]
Autobahn unten	Herstellung	37,31	6,06E-06	1,27E-02	3,08E-02	1,17E-01	5,11E+02
Autobahn unten	Nutzung	2,18	3,79E-07	-2,51E-04	1,03E-03	3,61E-03	3,20E+01
Autobahn unten	Rückbau	2,21	3,95E-07	6,91E-04	1,57E-03	6,09E-03	3,34E+01
Landesstr. oben	Herstellung	0	0	0	0	0	0
Landesstr. oben	Nutzung	5,98	1,08E-06	2,50E-03	4,64E-03	1,82E-02	9,13E+01
Landesstr. oben	Rückbau	1,00	1,80E-07	4,17E-04	7,74E-04	3,03E-03	1,52E+01
oben + unten	Herstellung	37,31	6,06E-06	1,27E-02	3,08E-02	1,17E-01	5,11E+02
oben + unten	Nutzung	8,17	1,46E-06	2,25E-03	5,67E-03	2,18E-02	1,23E+02
oben + unten	Rückbau	3,20	5,75E-07	1,11E-03	2,35E-03	9,12E-03	4,86E+01
oben + unten	LZ	48,68	8,09E-06	1,60E-02	3,88E-02	1,48E-01	6,83E+02

Brücke A2-B  Strategie → DTV 70.000

## F.2 Ökobilanzierung Brücken

### F.2.1 Brücke A1 (Integralbrücke): Bauwerksbezogene ökobilanzielle Ergebnisse

Lebens- zyklusphase	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ges</sub> [MJ/m <sup>2</sup> a]
Herstellung	13,76	3,51E-03	3,76E-03	2,77E-02	6,27E-08	1,20E+02	1,30E+02
Nutzung	3,52	1,71E-03	1,69E-03	1,09E-02	1,30E-08	5,22E+01	5,50E+01
Rückbau	0,88	1,46E-04	8,29E-04	4,65E-03	9,68E-12	1,35E+01	1,46E+01
Recycling	-3,82	-1,40E-03	-6,17E-04	-7,62E-03	1,81E-08	-3,54E+01	-3,57E+01
Gesamter LZ	14,35	3,96E-03	5,66E-03	3,56E-02	9,39E-08	1,50E+02	1,64E+02

Brücke A1  Strategie →

### F.2.2 Brücke A2-V (Zweifeld-Stahlverbundbrücke): Bauwerksbezogene ökobilanzielle Ergebnisse

Lebens- zyklusphase	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ges</sub> [MJ/m <sup>2</sup> a]
Herstellung	12,51	3,09E-03	3,43E-03	2,51E-02	4,61E-08	1,05E+02	1,15E+02
Nutzung	3,80	1,80E-03	1,65E-03	1,16E-02	9,37E-09	5,59E+01	5,90E+01
Rückbau	0,85	1,41E-04	7,96E-04	4,46E-03	9,30E-12	1,30E+01	1,40E+01
Recycling	-3,24	-1,17E-03	-5,24E-04	-6,47E-03	1,36E-08	-3,00E+01	-3,03E+01
Gesamter LZ	13,92	3,86E-03	5,36E-03	3,47E-02	6,91E-08	1,44E+02	1,57E+02

Brücke A2-V  Strategie →

**F.2.3 Brücke A2-B (Zweifeld-Stahlbetonbrücke): Bauwerksbezogene ökobilanzielle Ergebnisse**

Lebens- zyklusphase	GWP [kg CO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	POCP [kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	EP [kg PO <sub>4</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	AP [kg SO <sub>2</sub> - Äq./m <sup>2</sup> a]	OPD [kg R11- Äq./m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ne</sub> [MJ/m <sup>2</sup> a]	PE <sub>ges</sub> [MJ/m <sup>2</sup> a]
Herstellung	11,38	2,30E-03	3,15E-03	2,24E-02	9,56E-10	8,86E+01	9,88E+01
Nutzung	3,76	1,72E-03	1,38E-03	1,11E-02	1,40E-09	5,45E+01	5,74E+01
Rückbau	0,94	1,55E-04	8,80E-04	4,93E-03	1,03E-11	1,43E+01	1,55E+01
Recycling	-2,79	-1,13E-03	-4,50E-04	-5,57E-03	4,71E-11	-2,58E+01	-2,61E+01
Gesamter LZ	13,29	3,04E-03	4,96E-03	3,29E-02	2,41E-09	1,32E+02	1,46E+02

Brücke A2-B  Strategie →

# Anhang G: Indikatoren zur Infrastrukturbewertung

## Vorbemerkungen

In der Literatur vorgeschlagene Indikatoren für die Bewertung von Infrastrukturbauwerken werden im Folgenden zusammengefasst. Die Indikatorenliste wird nach der in Deutschland verbreiteten Gliederungssystematik strukturiert, die die drei Nachhaltigkeitsdimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales ergänzt durch technisch-funktionale Aspekte und Prozessaspekte verwendet. Standortbezogene Aspekte werden nicht separat ausgewiesen, sondern sind den übrigen Dimensionen zugeordnet.

Drei der vier untersuchten Studien nehmen eine Analyse vor, welche Bedeutung die einzelnen Indikatoren in einem Bewertungssystem haben sollten, indem Umfragen durchgeführt und Expertenmeinungen aufgenommen werden. Dabei kommt i. d. R. das mathematische Verfahren des analytischen Hierarchie Prozesses (AHP) für die Auswertung der Umfragen zum Einsatz. Die Ergebnisse liefern einen ersten Anhaltspunkt für die Definition von Wichtungsfaktoren, die bei der Zusammenführung der Einzelindikatoren zur Anwendung kommen müssen.

Die Indikatoren werden abschließend bezüglich ihrer Anwendbarkeit im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen von Brückenbauwerken bewertet. Des Weiteren wird gekennzeichnet, ob die Indikatoren Überschneidungen mit den in dieser Arbeit verwendeten Berechnungsmethoden der Ökobilanzierung, Lebenszykluskostenrechnung und externen Kostenrechnung aufweisen. Hat ein durch den jeweiligen Indikator beschriebener Betrachtungsgegenstand auch Auswirkungen auf Ergebnisse der drei Berechnungsmethoden, ist dies mit einem „ja“ gekennzeichnet. Hierdurch wird ersichtlich, dass ein Betrachtungsgegenstand sowohl in einem Modell als auch in einem separat formulierten Indikator abgebildet werden kann.

Beschreibung		Quelle			Auswirkung auf					
Dimension	Kriterien- gruppe	Indikator	Ugwu et al. (2006)	Koo et al. (2009)	Sánchez et al. (2010)	Anwend- bar für Brücken	Öko- bilanz	Lebens- zyklus- kosten	externe Kosten	
Ökonomie	direkte Kosten	Herstellungskosten	53	15	x	x	ja	-	ja	-
		Lebenszykluskosten	10	7	x	7	ja	-	ja	-
	indir. Kosten Nutzen	Kosten Umsiedlung von Anwohnern	47	52	x	-	(ja)	-	-	ja
		Kosten Wiederherstellung Ökosystem	34	27	x	-	(ja)	-	-	ja
		öffentlicher Nutzen des Projekts	-	-	x	6	ja	-	-	-
Ökologie (1)	Landnutzung	Größe des Landerwerbs	35	55	x	-	(ja)	-	ja	-
		Anzahl gefällter Bäume	16	59	-	-	ja	-	-	-
		Verlust an Habitatsfläche	7	56	x	19	(ja)	-	-	ja
		Verbindung mit Hinterland	45	61	-	-	-	-	-	-
		Wiederherstellung Habitate	21	26	-	x	ja	-	-	-
	Wasser	Schutz Biodiversität	-	-	-	20	ja	(ja)	-	-
		Emissionen in Wasser	5	23	x	3	ja	ja	-	-
		Wasserwiederverwendung	24	40	-	12	(ja)	ja	-	-
		Emissionen in Luft	12	18	x	3	ja	ja	-	ja
		CO2-Emissionen	-	-	-	4	ja	ja	-	ja

x = Indikator vorhanden

1,2,...= Indikatorrang in der entsprechenden Veröffentlichung (1 entspricht der größten Bedeutung)

Beschreibung		Quelle			Auswirkung auf					
Dimension	Kriterien- gruppe	Indikator	Ugwu et al. (2006)	Ugwu et al. (2007)	Koo et al. (2009)	Sánchez et al. (2010)	Anwend- bar für Brücken	Öko- bilanz	Lebens- zyklus- kosten	externe Kosten
Ökologie (2)	Lärm	Lärmemissionen	26	20	x	26	ja	(ja)	-	ja
		Möglichkeiten der Lärmreduktion	17	22	-	-	ja	-	-	-
	Licht	Lichtverschmutzung	-	-	-	x	(ja)	(ja)	-	(ja)
	Boden	Emissionen in Boden	6	12	x	3	ja	ja	-	-
	Abfall	Umgang mit festem Abfall	8	19	x	2	ja	ja	-	-
		Umgang mit Aushub	18	25	-	x	ja	-	-	-
		Flüssige, toxische Materialien	9	13	x	2	ja	ja	-	-
		Flüssige, nicht toxische Materialien	35	48	x	2	ja	ja	-	-
		Grad des Eingriffs im Baugebiet	18	49	-	24	ja	-	-	-
	Humantoxi- tät	Kurzfristige Gesundheit Ausführende	24	8	-	5	ja	-	-	-
		Langfristige Gesundheit Ausführende	4	3	-	5	ja	-	-	-
		Gesundheit Dritter	3	4	-	5	ja	(ja)	-	ja
	Energie / Ressourcen	Verbrauch regenerativer Energie	-	-	x	9	ja	ja	ja	-
		Verbrauch nicht regenerativer Energie	-	-	x	1	ja	ja	ja	-
		Abbau natürlicher Ressourcen	-	-	x	8	ja	ja	ja	-

x = Indikator vorhanden  
 1,2,...= Indikatorrang in der entsprechenden Veröffentlichung (1 entspricht der größten Bedeutung)

Beschreibung		Quelle			Auswirkung auf					
Dimension	Kriterien- gruppe	Indikator	Ugwu et al. (2006)	Ugwu et al. (2007)	Koo et al. (2009)	Sánchez et al. (2010)	Anwend- bar für Brücken	Öko- bilanz	Lebens- zyklus- kosten	externe Kosten
Soziales	Kulturerbe	Archäologische Beeinträchtigung	23	35	x	x	(ja)	-	-	-
		Kulturelle Beschwerden Anwohner	41	43	x	-	-	-	-	-
Öffentlicher Zugang		Trennwirkung	50	60	x	17	-	-	-	ja
		Grad an Sperrungen	46	54	x	25	ja	-	-	ja
		Grad an Behinderungen / Stau	-	50	x	25	ja	(ja)	-	ja
		Entsorgungswege	38	31	x	-	(ja)	ja	(ja)	-
Öffentl. Par- tizipation		Verlust an touristischer Attraktivität	51	53	-	30	ja	-	-	-
		Schaffung dauerhafter Arbeitsplätze	52	24	-	21	(ja)	-	-	-
		Einbindung der Öffentlichkeit	-	-	-	16	ja	-	-	-
Ästhetik		Einbindung lokaler Behörden	37	54	-	x	ja	-	-	-
		Bewertung des Gutachterremiums	54	42	-	27	ja	-	-	-
Sicherheit		Einfügen in Umgebung	27	14	x	27	ja	-	-	-
		Sicherheit der Nutzer	2	1	x	5	ja	-	-	-
		Vulnerabilität Vandalismus, Anschläge	-	-	-	x	-	ja	-	-

x = Indikator vorhanden  
 1,2,... = Indikatorrang in der entsprechenden Veröffentlichung (1 entspricht der größten Bedeutung)



Beschreibung		Quelle			Auswirkung auf					
Dimension	Kriterien- gruppe	Indikator	Ugwu et al. (2006)	Ugwu et al. (2007)	Koo et al. (2009)	Sánchez et al. (2010)	Anwend- bar für Brücken	Öko- bilanz	Lebens- zyklus- kosten	externe Kosten
Technik, Funktion	Baustellen- zugang	Baustraßen für Baustellenverkehr	44	21	-	-	ja	-	ja	-
		Verfügbarkeit von Baumaterial	22	9	-	28	-	(ja)	-	-
Bauwerke	Länge der geplanten Lebensdauer	Zugänglichkeit	-	-	x	-	ja	(ja)	ja	-
		Wartung u. Instandsetz.	-	-	x	29	ja	-	ja	-
		Abriss- und recyclinggerechtes Design	-	-	-	15	ja	ja	-	ja
		Berücksichtigung Extremereignisse	-	-	-	13	ja	-	-	-
Bau- materialien	Verwendung regionaler Materialien	Verfügbarkeit von Sekundärmaterial	29	38	x	28	(ja)	(ja)	-	-
		Innovative Materialien	15	33	-	22	(ja)	-	-	-
Integrale Planung	Frühe Einbindung Bauunternehmen	Frühe Einbindung Lieferanten	28	36	-	x	ja	-	-	-
		Auslegung Luftaustritt	33	41	-	x	ja	-	-	-
Luftqualität	Ventilationsdesign - Bau	Ventilationsdesign - Nutzung	42	51	-	x	-	-	-	-
		Ventilationsdesign - Bau	32	44	-	-	-	-	-	-
			11	32	-	-	-	-	-	-

x = Indikator vorhanden  
 1,2,... = Indikatorrang in der entsprechenden Veröffentlichung (1 entspricht der größten Bedeutung)

Beschreibung		Quelle			Auswirkung auf					
Dimension	Kriterien- gruppe	Indikator	Ugwu et al. (2006)	Koo et al. (2009)	Sánchez et al. (2010)	Anwend- bar für Brücken	Öko- bilanz	Lebens- zyklus- kosten	externe Kosten	
Prozess	Qualitäts- management	Leicht zugängliche Qualitätskontrolle	40	10	-	23	ja	-	ja	-
		Managementsystem existent	-	5	-	18	ja	-	-	-
	Wiederver- wendung	Wiederverwendung der Schalung	1	30	-	-	ja	ja	-	-
		Wert Recycling- und Abfallmaterial	31	57	x	-	(ja)	-	ja	-
	Bauphase	Unfälle, Verletzungen Bauphase	14	2	x	x	ja	-	-	ja
		Projektdauer	-	29	x	-	ja	-	ja	ja
		Verhinderung Erosion, Rutschungen	-	-	x	x	ja	-	-	-
		Vorgefertigte Bauelemente	18	47	-	-	ja	ja	-	-
	Vertrag	Vertragstyp	49	11	x	x	ja	-	-	-
		Nachhaltigkeit vertraglich vereinbart	13	17	x	-	ja	-	-	-
Projektkomplexität		-	34	-	-	ja	-	-	-	
Anzahl an Formularen		42	58	-	-	ja	-	-	-	
Ausschrei- bung	Einbindung des Bauunternehmens	39	29	x	-	ja	-	-	-	
	Einbindung der Lieferanten	48	39	-	-	ja	-	-	-	
	Beeinflussbarkeit Ausschreibungsart	-	37	-	-	ja	-	-	-	

x = Indikator vorhanden

1,2,...= Indikatorrang in der entsprechenden Veröffentlichung (1 entspricht der größten Bedeutung)

## Literaturverzeichnis

- ADAC (2013). *Autokosten 2013*. Nr. 17.03.1000 - IN27850. München: ADAC Fahrzeugtechnik.
- ADEY, B. T., MIRZAEI, Z., KLATTER, L. und KONG, J. S. (2012). *Overview of existing Bridge Management Systems*. IABMAS 2012. The IABMAS Bridge Management Committee.
- AHLROTH, S., NILSSON, M., FINNVEDEN, G., HJELM, O. und HOCHSCHORNER, E. (2011). Weighting and valuation in selected environmental systems analysis tools – suggestions for further developments. In: *Journal of Cleaner Production* 19 (2), S. 145–156.
- ALMANSA, C. und MARTÍNEZ-PAZ, J. M. (2011). What weight should be assigned to future environmental impacts? A probabilistic cost benefit analysis using recent advances on discounting. In: *The Science of the total environment* 409 (7), S. 1305–1314.
- ANG, A. H.-S. und TANG, W. H. (2007). *Probability concepts in engineering: Emphasis on applications in civil & environmental engineering*. Second edition. Hoboken, NJ: Wiley.
- ARUP (2012). *SPeAR Handbook 2012: External Version*. Version 1.1. Sustainable Project Appraisal Routine, London.
- AUTOBAHNDIREKTION SÜDBAYERN (2012). *Verkehrsmengenkarte 2010, Bundesautobahnen Südbayern*. Erstellt: 08. März 2012. München: Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Inneren.
- AZAR, C. und STERNER, T. (1996). Discounting and distributional considerations in the context of global warming. In: *Ecological Economics* 19 (2), S. 169–184.
- BBR (2001). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- BBSR (2011). *Regionalentwicklung auf dem Weg zu mehr Nachhaltigkeit – Aktuelle Ergebnisse des BBSR-Indikatorenkonzepts*. BBSR-Berichte 4/2011. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung.
- BFK (1994). *Alterungsverhalten von Bauteilen und Unterhaltskosten – Grundlagendaten für den Unterhalt und die Erneuerung von Wohnbauten*. Nummer 724.441d. Bern: Bearbeitet von Meyer, P., Büchler, M., Christen, K. und Waibel, A., Bundesamt für Konjunkturforschung.
- BMVBS (2013a). *Grundkonzeption für den Bundesverkehrswegeplan 2015*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.

- BMVBS (2013b). *Leitfaden Nachhaltiges Bauen*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- BAHR, C. und LENNERTS, K. (2010). *Lebens- und Nutzungsdauer von Bauteilen*. Aktenzeichen 10.08.17.7-08.20. Im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Berlin.
- BAIER, R. (2014). *Die neuen Richtlinien für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (RWS)*. Bergisch-Gladbach: Vortrag am 04. November 2014 im Rahmen des Bast-Workshops „Die nachhaltige Straße“.
- BAKABA, J. E., ENKE, M., HEINE, A., LIPPOLD, C., MAIER, R., ORTLEPP, J. und SCHULZ, R. (2012). *Untersuchung der Verkehrssicherheit im Bereich von Baustellen auf Bundesautobahnen*. Forschungsbericht VI 04. Berlin: Im Auftrag des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
- BAMBERG, G., COENENBERG, A. G. und KRAPP, M. (2008). *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*. 14. Auflage. München: Vahlen.
- BARBOSA, J. A., MATEUS, R. und BRAGANÇA, L. (2011). Development of a sustainability assessment tool for office buildings. In: *Sustainability of Constructions: Towards a better built environment*. Hrsg. von L. BRAGANÇA, H. KOUKKARI, R. BLOK, M. GERVÁSIO, M. VELJKOVIC, R. BORG, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU und C. SCHAUR. Malta: Gutenberg Press Ltd, S. 205–214.
- BARTLING, H. und LUZIUS, F. (2008). *Grundzüge der Volkswirtschaftslehre: Einführung in die Wirtschaftstheorie und Wirtschaftspolitik*. 16. Aufl. Vahlers Lernbücher. München: Vahlen.
- BAST (2011). *Datenabfrage aus der Straßeninformationsbank – Teilbereich Bauwerke: Datenbank der Bundesanstalt für Straßenwesen*. Stand der Datengrundlage: 01.09.2010. Auszug erstellt durch Heinz Friedrich und Rolf Kaschner im Mai 2011, Bergisch-Gladbach.
- BAUM, H., ESSER, K. und HÖHNSCHIED, K.-J. (1998). *Volkswirtschaftliche Kosten und Nutzen des Verkehrs*. Heft 108, Forschungsarbeiten aus dem Straßen- und Verkehrswesen. Bonn: Kirschbaum.
- BAUMGÄRTNER, U., FISCHER, O., JUNGWIRTH, J., KATZ, C., LEDERER, W., PUTZ, A., STREIT, W., WILLBERG, U. und WÜST, W. (2012). Ganzheitliche Beurteilung von Verkehrsinfrastrukturprojekten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (8), S. 510–523.
- BAYIKA (2011). *Dokumentation des Ideenwettbewerbs: Entwurf einer Straßenbrücke nach ganzheitlichen Wertungskriterien*. Bayerische Ingenieurekammer-Bau. Wiesbaden: Wiederspahn.
- BECK, T., FISCHER, M., FRIEDRICH, H., KASCHNER, R., KUHLMANN, U., LENZ, K., MAIER, P., MENSINGER, M., PFAFFINGER, M., SEDLBAUER, K., UMMENHOFER, T. und ZINKE, T.

- (2013). Instandhaltungsstrategien als Basis für die ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. In: *Stahlbau* 82 (1), S. 3–10.
- BECKMANN, A. und ZACKOR, H. (2001). *Untersuchung und Eichung von Verfahren zur aktuellen Abschätzung von Staudauer und Staulängen infolge von Tages- und Dauerbaustellen auf Autobahnen*. Heft 808, Bericht zum FE-Vorhaben 03.313/1998/IGB. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- BENESCH, T. (2013). *Schlüsselkonzepte zur Statistik: Die wichtigsten Methoden Verteilungen Tests anschaulich erklärt*. Heidelberg: Springer Spektrum.
- BERGMANN, M., BROHMANN, B., HOFFMANN, E., LOIBL, M. C., REHAAG, R., SCHRAMM, E. und VOSS, J.-P. (2005). *Qualitätskriterien transdisziplinärer Forschung: Ein Leitfaden für die formative Evaluation von Forschungsprojekten*. ISOE-Studentexte Nr. 13. Frankfurt/Main: Institut für sozial-ökologische Forschung (ISOE) GmbH.
- BICKEL, P. (2005). *Externe Grenzkosten verkehrsbedingter Umwelt- und Gesundheitsrisiken: Eine orts- und situationsabhängige Analyse auf Basis des Wirkungspfadansatzes*. Baden-Baden: Nomos.
- BOCCHINI, P., FRANGOPOL, D. M., UMMENHOFER, T. und ZINKE, T. (2014). Resilience and Sustainability of Civil Infrastructure: Toward a Unified Approach. In: *Journal of Infrastructure Systems* 20 (2), S. 04014004.
- BOGNER, A. (2010). *Inter- und Transdisziplinarität im Wandel? Neue Perspektiven auf problemorientierte Forschung und Politikberatung*. Schriftenreihe Wissenschafts- und Technikforschung, Bd. 4. Baden-Baden: Nomos.
- BRAGANÇA, L., KOUKKARI, H., BLOK, R., GERVÁSIO, M., VELJKOVIC, M., BORG, R., LANDOLFO, R., UNGUREANU, V. und SCHAUR, C., Hrsg. (2011). *Sustainability of Constructions: Towards a better built environment: Proceedings of the Final Conference of COST Action C25, Innsbruck, 3-5 February 2011*. Malta: Gutenberg Press Ltd.
- BRANS, J. P. und VINCKE, P. H. (1985). A Preference Ranking Organisation Method (The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making). In: *Management Science* 31 (6), S. 647–656.
- BRÜHWILER, E. und ADEY, B. (2005). Improving the consideration of life-cycle costs in bridge decision-making in Switzerland. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 1 (2), S. 145–157.
- BRUNDTLAND, G. H., Hrsg. (1987). *Our common future [Brundtland-Report]*. World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford Univ. Pr.
- BRUNEAU, M., CHANG, S. E., EGUCHI, R. T., LEE, G. C., O'ROURKE, T. D., AM REINHORN, SHINOZUKA, M., TIERNEY, K., WALLACE, W. A. und WINTERFELDT, D. von (2003). A

- framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities. In: *Earthquake Spectra* 19 (4), S. 733–752.
- BUNDESANZEIGER (2010). *Bekanntmachung über die Nutzung und die Anerkennung von Bewertungssystemen für das nachhaltige Bauen*. Nummer 70 vom 07.05.2010, S. 1642–1644. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin.
- CAFE (2005). *Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE: Volume 1: Overview of Methodology*. No. AEAT/ED51014. Didcot: AEA Technology Environment.
- CEEQUAL (2010). *Scheme Description and Assessment Process Handbook*. Version 4.1 for Projects. The Assessment and Awards Scheme for improving sustainability in civil engineering and the public realm, London.
- COMPETE (2006). *Analysis of the contribution of transport policies to the competitiveness of the EU economy and comparison with the United States*. No. TREN/05/MD/S07.53585, Version 2.1. Karlsruhe: Fraunhofer Institute Systems and Innovation Research.
- DJSI (2013). *Dow Jones Sustainability World – Index Guide*. Version 12.3. Zürich: RobecoSAM AG.
- DASGUPTA, S. und TAM, E. K. (2005). Indicators and framework for assessing sustainable infrastructure. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 32, S. 30–44.
- DESTATIS (2014). *Preisindizes für die Bauwirtschaft: Februar 2014*. Erschienen am 9. April 2014, Artikelnummer: 2170400143214. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- DRAEGER, S. (2010). *Vergleich des Systems des Deutschen Gütesiegels Nachhaltiges Bauen mit internationalen Systemen*. Aktenzeichen SF - 10.08.17.7-09.15. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- EC (1995a). *ExternE - Externalities of Energy, Vol. 1: Summary*. Report No. EUR 16520. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- EC (1995b). *Towards Fair and Efficient Pricing in Transport, Polica Instruments for Internalising the External Costs of Transport in the European Union*. Report No. COM(95)691. Brussels: European Commission.
- EC (2014). *Update of the Handbook on External Costs of Transport*. Ref. ED 57769, Issue Number 1. London: European Commission – DG Mobility and Transport.
- ETSI (2009). *ETSI Project (Stage 2): Bridge Life Cycle Optimisation*. TKK-R-BE3. Helsinki University of Technology (TKK).
- EBERHARDT, M., EGGER, N. und WECKBACH, M. (2013). *Rechnungswesen – Spedition und Logistikdienstleistungen*. 14. Aufl. Braunschweig: Winklers.
- EBERT, T., ESSIG, N. und HAUSER, G. (2010). *Zertifizierungssysteme für Gebäude: Nachhaltigkeit bewerten – Internationaler Systemvergleich – Zertifizierung und Ökonomie*. 1. Aufl. Edition Detail. München: Inst. für intern. Architektur-Dok.

- ELBEL, G. und PREISSMANN, J. (2012). Jährliche Neugewichtung des Harmonisierten Verbraucherpreisindex. In: *Wirtschaft und Statistik, August 2012*. Hrsg. von DESTATIS. Wiesbaden, S. 671–676.
- ELLINGHAM, I. und FAWCETT, W. (2006). *New generation whole-life costing: Property and construction decision-making under uncertainty*. London: Taylor & Francis.
- ENVISION (2012). *A Rating System for Sustainable Infrastructure*. Version 2.0. Zofnass Program for Sustainable Infrastructure, Cambridge.
- ESSEN, H. van, SCHROTEN, A., OTTEN, M., SUTTER, D., SCHREYER, C., ZANDONELLA, R., MAIBACH, M. und DOLL, C. (2011). *External Costs of Transport in Europe: Update Study for 2008*. Publication code: 11.4215.50. Delft: CE Delft - Solutions for environment, economy and technology.
- EUROPEAN COMMISSION (2007). *Lead Market Initiative For Europe*. Online verfügbar unter: <http://ec.europa.eu/enterprise/policies/innovation/policy/lead-market-initiative>, Abgerufen am 28.05.2011.
- FIDIC (2004). *Project Sustainability Management Guidelines*. Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils, Geneva.
- FAHRMEIR, L., KÜNSTLER, R., PIGEOT, I. und TUTZ, G. (2007). *Statistik: Der Weg zur Datenanalyse*. Sechste, überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- FOGIB (1997). *Ingenieurbauten – Wege zu einer ganzheitlichen Bewertung*. Band 1–3. Universität Stuttgart. Abschlussbericht der DFG-Forschergruppe Ingenieurbauten.
- FRANGOPOL, D. M. (2011). Life-cycle performance, management, and optimisation of structural systems under uncertainty: accomplishments and challenges. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 7 (6), S. 389–413.
- FRIEDRICH, H., KUHLMANN, U., KRILL, A., LENZ, K., MAIER, P., MENSINGER, M., PFAFFINGER, M., SEDLBAUER, K., UMMENHOFER, T. und ZINKE, T. (2013). Nachhaltigkeitsanalyse von Verbundstraßenbrücken am Beispiel einer Autobahnüberführung. In: *VDI-Bautechnik* Jahressausgabe 2013/2014, S. 111–119.
- GRACE (2005). *Information Requirements for Monitoring Implementation of Social Marginal Cost Pricing: Deliverable 1*. No. FP6-006222, Version 1.0. Leeds: Institute for Transport Studies (ITS), University of Leeds.
- GRI (2013). *Sustainable Reporting Guidelines: Reporting Principles and Standard Disclosure*. Version 2013. Amsterdam: Global Reporting Initiative.
- GELDERMANN, J. (2006). *Mehrzielentscheidungen in der industriellen Produktion*. Karlsruhe: Universitätsverlag, Habilitation.
- GERVÁSIO, H. M. (2010). *Sustainable Design and integral Life-Cycle-Analysis of Bridges*. Coimbra: Universidade de Coimbra, Dissertation.

- GERVÁSIO, H. M. und SILVA, S. d. (2012). A probabilistic approach for life-cycle environmental analysis of motorway bridges. In: *Life-Cycle and Sustainability of Civil Infrastructure Systems, Proceedings of the Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Vienna, Austria, 3-6 October 2012*. Hrsg. von A. STRAUSS, D. M. FRANGOPOL und K. BERGEMEISTER. Leiden: CRC Press/Balkema, S. 657–664.
- GÖTZE, U. (2008). *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. Sechste, durchgesehene und aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.
- GRAUBNER, C.-A., SCHNEIDER, C., SCHULTE, C. und MIELECKE, T. (2009). Umwelt- und Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme für Gebäude im Vergleich: „BREEAM“, „LEED“ und das „Deutsche Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“. In: *Bauingenieur* 84 (8), S. 320–329.
- GRAUBNER, C.-A. und MIELECKE, T. (2012). Nachhaltige Ingenieurbauwerke. In: *Bauingenieur* 87 (4), S. 156–164.
- GRAUBNER, C.-A., REINHARD, S., SCHNEIDER, C., HOCK, C., LÜTZKENDORF, T. und ZAK, J. (2007). *Studie zur Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden*. Herausgegeben vom Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn.
- GRAUBNER, C.-A., BAUMGÄRTNER, U., FISCHER, O., HAARDT, P., KNAUFF, A. und PUTZ, A. (2010). Nachhaltigkeitsbewertung für die Verkehrsinfrastruktur. In: *Bauingenieur* 85, S. 331–340.
- GREENROADS (2011). *Abridged Manual*. Version 1.5. Seattle: University of Washington.
- GRIFFITHS, G. (2007). Project Sustainability Management in Infrastructure Projects. In: *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainability Engineering and Science, Auckland, NZ, 21-23 February 2007*.
- GÜNNEWIG, D., BALLA, S., HANUSCH, M., WENDE, W., BECKERS, T., RIEKEN, P., DAMMERT, B. und RIEGER, G. J. (2010). *Erarbeitung eines Konzepts zur „Integration einer Strategischen Umweltprüfung in die Bundesverkehrswegeplanung“*. FE-Vorhaben 96.0904/2007. Bosch & Partner GmbH, Hannover.
- HBEFA (2010). *Handbook of Emission Factors for Road Transport, Onlineanwendung verfügbar unter <http://www.hbefa.net>*. Version 3.1, Jan. 2010. Bern: INFRAS.
- HEATCO (2006). *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment: Deliverable D5: Proposal for Harmonised Guidelines*. No. FP6-2002-SSP-1/502481. Stuttgart: Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendungen.
- HLSV (2010). *Nachhaltiges Bauen – Ökobilanzierung und Lebenszykluskosten von vier Straßenbrücken*. Forschungsbericht F15-10-2010. Bearbeitet von C.-A. Graubner und Achim Knauff, TU Darmstadt. Hessisches Landesamt für Straßen- und Verkehrswesen, Wiesbaden.



- HAARDT, P. (1999). *Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken*. Heft B 22. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- HAARDT, P. (2003). *Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz: Stufen 1 und 2*. Heft B 43. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- HABER, W. (1995). Das Nachhaltigkeitsprinzip als ökologisches Konzept. In: *Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive: eine Publikation der Karl-Heinz-Beckurts-Stiftung*. Hrsg. von P. FRITZ, J. HUBER und H. W. LEVI. Edition Universitas. Stuttgart: Hirzel, S. 17–30.
- HAUSBERGER, S., REXEIS, M., ZALLINGER, M. und LUZ, R. (2009). *Emission Factors from the Model PHEM for the HBEFA Version 3*. Report Nr. I-20/2009 Haus-Em 33/08/679. Graz: Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology.
- HEIJUNGS, R. und GUINÉE, J. B. (1993). CML on actual versus potential risks. In: *LCA news, SETAC-Europe* 3 (4), S. 4.
- HEITEL, S., KORIATH, H., HERZOG, C. S. und SPECHT, G. (2008). Vergleichende Lebenszykluskostenanalyse für Fußgängerbrücken aus unterschiedlichen Werkstoffen. In: *Bau-technik* 85 (10), S. 687–695.
- HELLMANN, L., MAERSCHALK, G. und RÜBENSAM, J. (2002). *Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung von Maßnahmenvarianten für die Erhaltungsplanung auf Objektebene*. FE 15.323/2000/HRB. Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen.
- HELLMANN, L., RÜBENSAM, J. und SCHWIETHAL, S. (2008). *Entwicklung von Verfahrenshilfen zur Berücksichtigung baustellenbedingter Nutzerkosten im Erhaltungsmanagement*. Heft 988, Bericht zu den FE-Vorhaben 09.133/2003/MRB und 09.135/2004/MGB. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- HENDY, C. und PETTY, R. (2012). Quantification of sustainability principles in bridge projects. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, 8-12 July 2012*. Hrsg. von F. BIONDINI und D. FRANGOPOL. London: CRC Press, 359, Full text on DVD.
- HETTINGER, A.-L., THOMAS, J.-S., HECHLER, O. und CONAN, Y. (2011). Life Cycle Assessment of Composite Bridges. In: *Sustainability of Constructions: Towards a better built environment*. Hrsg. von L. BRAGANÇA, H. KOUKKARI, R. BLOK, M. GERVÁSIO, M. VELJKOVIC, R. BORG, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU und C. SCHAUR. Malta: Gutenberg Press Ltd, S. 361–372.

- HOLST, R. (2006). *Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3*. Heft B 50. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- HUBER, J. (1995). Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. In: *Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive: eine Publikation der Karl-Heinz-Beckurts-Stiftung*. Hrsg. von P. FRITZ, J. HUBER und H. W. LEVI. Edition Universitas. Stuttgart: Hirzel, S. 31–46.
- HWANG, C.-L. und YOON, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications; a state-of-the-art survey*. Bd. 186. Lecture notes in economics and mathematical systems. Berlin, Heidelberg: Springer.
- IFEU (2011). *UmweltMobilCheck – Wissenschaftlicher Grundlagenbericht*. Stand: 31. März 2011. Heidelberg: Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.
- INFRAS/IIW (2000). *External Costs of Transport: Accident, Environmental and Congestion Costs in Western Europe*. No. 2-7461-0079-7. Zürich, Karlsruhe.
- INFRAS/IIW (2007). *Externe Kosten des Verkehrs in Deutschland: Aufdatierung 2005*. Bericht B1669A1. Zürich.
- JÄGER, T. und KARGER, C. R. (2004). *Instrumente zur Nachhaltigkeitsbewertung – Eine Synopse: Studie im Rahmen des Verbundprojektes „Integrierte Mikrosysteme der Versorgung“*. Arbeitspaket 400. Forschungszentrum Jülich GmbH.
- JAMISON, A. (1996). The shaping of the global environmental agenda: The role of non-governmental organizations. In: *Risk, Environment and Modernity*. Hrsg. von S. LASH, B. SZERSZYNSKI und B. WYNNE. London: Sage Publications, S. 224–245.
- JODL, H. G. (2010). Lebenszykluskosten von Brücken – Teil 1 und 2 – Berechnungsmodell LZKB. In: *Bauingenieur* (85), S. 221–240.
- KALOS, M. H. und WHITLOCK, P. A. (2008). *Monte Carlo Methods*. 2nd Edition. Weinheim: Wiley.
- KIRSCHFINK, H. und RIEGELHUTH, G. (2003). Umfassendes Baustellenmanagementsystem in Hessen. In: *Straße + Autobahn* 54 (11), S. 640–646.
- KLINGENBERGER, J. (2008). Modell zur Bildung von Strategien der Instandhaltung für Gebäude. In: *Bauingenieur* 83 (3), S. 99–107.
- KÖNIG, H. (2009). *Entwicklung einer Methodik zur Bestimmung von Orientierungswerten für Lebenszykluskosten: Teil 1: Bürogebäude*. Aktenzeichen 10.08.17.7 -08.15a. Ascona GbR im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Berlin.
- KOO, D.-H., ARIARATNAM, S. T. und KAVAZANJIAN, E. (2009). Development of a sustainability assessment model for underground infrastructure projects. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 36 (5), S. 765–776.

- KUHLMANN, U., BECK, T., FISCHER, M., FRIEDRICH, H., KASCHNER, R., MAIER, P., MENSINGER, M., PFAFFINGER, M., SEDLBAUER, K., UMMENHOFER, T. und ZINKE, T. (2011). Ganzheitliche Bewertung von Stahl- und Verbundbrücken nach Kriterien der Nachhaltigkeit. In: *Stahlbau* 80 (10), S. 703–710.
- KUHLMANN, U., MAIER, P., ZINKE, T., UMMENHOFER, T., PFAFFINGER, M., MENSINGER, M., SCHNEIDER, S., LENZ, K., BECK, T. und FRIEDRICH, H. (2014). Nachhaltigkeitsanalysen von Stahlverbundbrücken. In: *Stahlbau* 83 (7), S. 476–486.
- LFU (2000). *Schallemissionen und -immissionen von Brückenübergangskonstruktionen*. Ausgabe Oktober 2000. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.
- LAFFONT, S. (2012). *Quantifizierung von Verkehrsverlagerungen durch Baustellen an BAB: Quantifizierung der Verlagerungseffekte bei Bundesautobahnen (BAB) im Rahmen von Bewertungsverfahren für Erhaltungsmaßnahmen*. Heft V 2013. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- LANDOLFO, R. und VESIKARI, E. (2011). Service Life Design Methods for Civil Engineering Structures. In: *Summary Report of the Cooperative Activities of the COST Action C25*. Hrsg. von L. BRAGANÇA, H. KOUKKARI, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU, E. VESIKARI und O. HECHLER. Malta: Gutenberg Press Ltd, S. 17–27.
- LAUX, H. (2007). *Entscheidungstheorie*. 7. überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer.
- LEE, W. (2012). Benchmarking energy use of building environmental assessment schemes. In: *Energy and Buildings* 45 (2), S. 326–334.
- LITTIG, B. und GRIESSLER, E. (2004). *Soziale Nachhaltigkeit*. Nr. 160, Informationen zur Umweltpolitik. Wien: Bundeskammer für Arbeiter und Angestellte, Österreich.
- LÓPES, F. R. und SÁNCHEZ, G. F. (2011). Selecting Environmental Friendly Alternatives in Infrastructure Projects. In: *Sustainability of Constructions: Towards a better built environment*. Hrsg. von L. BRAGANÇA, H. KOUKKARI, R. BLOK, M. GERVÁSIO, M. VELJKOVIC, R. BORG, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU und C. SCHAUR. Malta: Gutenberg Press Ltd, S. 215–220.
- LOSKE, R., Hrsg. (1996). *Zukunftsfähiges Deutschland: Ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung*. Basel: Birkhäuser.
- LÜNSER, H. (1998). *Ökobilanzen im Brückenbau: Eine umweltbezogene, ganzheitliche Bewertung*. Basel: Birkhäuser, Dissertation.
- LUPÍŠEK, A., VONKA, M. und HÁJEK, P. (2011). Czech assessment system SBToolsCZ. In: *Sustainability of Constructions: Towards a better built environment*. Hrsg. von L. BRAGANÇA, H. KOUKKARI, R. BLOK, M. GERVÁSIO, M. VELJKOVIC, R. BORG, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU und C. SCHAUR. Malta: Gutenberg Press Ltd, S. 221–224.

- LÜTZKENDORF, T. und LORENZ, D. (2004). *Integrating the concept of "environmental performance" into decision making processes along the life-cycle of buildings*. Proceedings of the Central and Eastern European Conference on Sustainable Building (SB04), Warsaw, Poland, 27-29 October, 2004.
- LÜTZKENDORF, T., KOHLER, N. und KÖNIG, H. (2012). Integrated Life Cycle Assessment: Benchmarks and Uncertainty. In: *Proceedings of the International Symposium on Life Cycle Assessment and Construction – Civil engineering and buildings, 10-12 July 2012, Nantes, France*. Hrsg. von A. VENTURA und C. de la ROCHE. Bagnaux: RILEM, S. 28–36.
- MAIBACH, M., SCHREYER, C., SUTTER, D., VAN ESSEN, H., BOON, B., SMOKERS, R., SCHROTTEN, A., DOLL, C., PAWLOWSKA, B. und BAK, M. (2008). *Handbook on estimation of external costs in the transport sector: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport*. Publication number: 07.4288.52. Delft: CE Delft - Solutions for environment, economy and technology.
- MAIBACH, M., MAUCH, S. P., ITEN, R., BANFI, S., OTT, W., LEDERGERBER, E. und MASUR, K. P. (1996). *Die vergessenen Milliarden: Externe Kosten im Energie- und Verkehrsbereich*. Bern: Haupt.
- MATEUS, R. und BRAGANÇA, L. (2011). Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SBToolPT - H. In: *Building and Environment* 46 (10), S. 1962–1971.
- MATSUMOTO, M. und NISHIMURA, T. (1998). Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator. In: *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 8 (1), S. 3–30.
- MAYER, A. L. (2008). Strengths and weaknesses of common sustainability indices for multidimensional systems. In: *Environment International* 34 (2), S. 277–291.
- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDER, J. und BEHRENS, W. W., Hrsg. (1972). *The limits to growth: A report for The Club of Rome's project on the predicament of mankind*. New York, NY: Universe Books.
- MEISTER, H.-P., FEINDT, P. H., TSCHÉULIN, J. und LEHMANN, S., Hrsg. (1997). *Bausteine für ein zukunftsfähiges Deutschland: Diskursprojekt im Auftrag von VCI und IG Chemie-Papier-Keramik*. Wiesbaden: Gabler.
- MENSINGER, M., ZINKE, T., PFAFFINGER, M. und SCHMIDT-THRÖ, G. (2012). Sustainable Bridges – A New Challenge for Engineers. In: *GJBS 2012 – Proceedings of the Ninth German-Japanese Bridge Symposium, Volume of Abstracts, Kyoto, Japan, 10-11 September 2012*. Hrsg. von K. SUGIURA. Kyoto: GJBS, S. 7–14.
- MÖLLER, D. (2003). *Luft: Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht*. Berlin: de Gruyter.
- NCHRP (2003). *Bridge Life-Cycle Cost Analysis*. Report 483. Washington, DC: National Cooperative Highway Research Program.

- NIBA (2006). *Nachhaltigkeitsindikatoren für Bahninfrastrukturprojekte: Leitfaden zur Bewertung von Projekten im Schienenverkehr*. Bern/Zürich: Bundesamt für Verkehr, BAV.
- NYSDOT (2010). *GreenLITES: Projekt Design Certification Program*. April 2010 (Version 2.1.0). New York State Department of Transportation.
- NARDO, M., SAISANA, M., SALTELLI, A. und TARANTOLA, S. (2005). *Tools for Composite Indicators Building*. Report No. EUR 21682 EN. Institute for the Protection and Security of the Citizen Econometrics and Statistical Support to Antifraud Unit, Ispra, Italien.
- NESS, B., URBELPIRSALU, E., ANERBERG, S. und OLSSON, L. (2007). Categorising tools for sustainability assessment. In: *Ecological Economics* 60 (3), S. 498–508.
- OBER-SUNDERMEIER, A. (2003). *Entwicklung eines Verfahrens zur Stauprognose an Engpässen auf Autobahnen unter besonderer Berücksichtigung von Arbeitsstellen*. Schriftenreihe Verkehr, Heft 15. Kassel: Kassel University Press, Dissertation.
- OBER-SUNDERMEIER, A. und OTTO, J. (2003). *Quantifizierung staubedingter Reisezeitverluste auf Bundesautobahnen – Störungsursache: Arbeitsstellen*. FE 01.153/2000/CRB. Im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- OEFNER, G., KRMEK, M. und NUSSRAINER, C. (2004). *Kostenermittlung für Erhaltungsmaßnahmen zur Bestimmung der Kosteneingangsgrößen für das PMS (Pavement Management System)*. Bd. Heft 896. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abt. Straßenbau, Straßenverkehr.
- OTT, W. R. (1978). *Environmental indices: Theory and practice*. Michigan: Ann Arbor Science Publications.
- OTTO, S. (2007). *Bedeutung und Verwendung der Begriffe nachhaltige Entwicklung und Nachhaltigkeit: Eine empirische Studie*. Jacobs University Bremen: Dissertation.
- PEARCE, D. W., MARKANDYA, A. und BARBIER, E. B. (1989). *Blueprint for a green economy*. London: Earthscan Publications.
- PIGOU, A. C. (1920). *The economics of welfare*. London: MacMillan.
- PINKOFSKY, L. (2006). *Typisierung von Ganglinien der Verkehrsstärke und ihre Eignung zur Modellierung der Verkehrsnachfrage*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehr und Stadtbauwesen, Bd. 54. Aachen, Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Dissertation.
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T. und FLANNERY, B. P. (1992). *Numerical recipes in C*. 2nd Edition. Cambridge: Cambridge Univ. Pr.
- RABL, A. (1996). Discounting of long-term costs: What would future generations prefer us to do? In: *Ecological Economics* 17 (3), S. 137–145.

- RABL, A. und HOLLAND, M. (2008). Environmental Assessment Framework for Policy Applications: Life Cycle Assessment, External Costs and Multi-criteria Analysis. In: *Journal of Environmental Planning and Management* 51 (1), S. 81–105.
- RADOMSKI, W. (2002). *Bridge Rehabilitation*. London: Imperial College Press.
- RAMETSTEINER, E., PÜLZL, H., ALKAN-OLSSON, J. und FREDERIKSEN, P. (2011). Sustainability indicator development—Science or political negotiation? In: *Ecological Indicators* 11 (1), S. 61–70.
- REICHELT, B. (2006). Instandhaltungsstrategie für kommunale Gebäude aus Sicht des Facility Management. In: *Technological and Economic Development of Economy* 12 (3), S. 236–245.
- RESSEL, W. (1994). *Untersuchungen zum Verkehrsablauf im Bereich der Leistungsfähigkeit an Baustellen auf Autobahnen*. Informationen Verkehrsplanung und Straßenwesen. München, Neubiberg: Univ. d. Bundeswehr, Dissertation.
- REXEIS, M., HAUSBERGER, S., RIEMERSMA, I., TARTAKOVSKY, L., ZVIRIN, Y., VAN POPPEL, M. und CORNELIS, E. (2005). *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems, WP400: Heavy duty vehicle emissions*. Report No. I 02/2005/Hb 20/2000 I680. Graz: Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics, Graz University of Technology.
- ROTHENGATTER, W. (1996). Externe Kosten des Verkehrs in Europa. In: *Externe Kosten von Energieversorgung und Verkehr*. Hrsg. von VDI. Düsseldorf: VDI, S. 91–105.
- ROUWENDAL, J. und VERHOEF, E. T. (2006). Basic economic principles of road pricing: From theory to applications. In: *Transport Policy* 13 (2), S. 106–114.
- SBRI (2013). *Sustainable Steel-Composite Bridges Handbook*. Online verfügbar unter: <http://www.arcelormittal.com/sections/library/steel-research-reports/bridges.html>, Abruf am 12.06.2013.
- SRU (1996). *Umweltgutachten 1996: Zur Umsetzung einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung*. Drucksache 13/4108 vom 14.03.1996. Rat von Sachverständigen für Umweltfragen.
- SRU (1998). *Umweltgutachten 1998: Umweltschutz: Erreichtes sichern – Neue Wege gehen*. Drucksache 13/10195 vom 03.03.1998. Rat von Sachverständigen für Umweltfragen.
- SAATY, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. New York, N.Y.: McGrawHill.
- SAHELY, H. R., KENNEDY, C. A. und ADAMS, B. J. (2005). Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 32 (1), S. 72–85.
- SALTELLI, A., TARANTOLA, S., CAMPOLONGO, F. und RATTO, M. (2004). *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Chichester, West Sussex: Wiley.

- SALTELLI, A., RATTO, M., ANDRES, T., CAMPOLONGO, F., CARIBONI, J., GATELLI, D., SAISANA, M. und TARANTOLA, S. (2008). *Global sensitivity analysis: The primer*. Chichester, West Sussex: Wiley.
- SÁNCHEZ, G. F. und LÓPEZ, F. R. (2010). A methodology to identify sustainability indicators in construction project management—Application to infrastructure projects in Spain. In: *Ecological Indicators* 10 (6), S. 1193–1201.
- SCHACH, R., OTTO, J., HÄUPL, H. und FRITZSCHE M. (2006). Lebenszykluskosten von Brückenbauwerken. In: *Bauingenieur* 81 (4), S. 343–350.
- SCHAUMANN, P., BECHTEL, A., WAGNER, H.-J., BAACK, C., LOHMANN, J., STRANGHÖNER, N. und BERG, J. (2011). Zur Nachhaltigkeitsbewertung von Stahlkonstruktionen für regenerative Energien. In: *Stahlbau* 80 (10), S. 711–719.
- SCHIESSL, P. und MAYER, T. F. (2009). Lebensdauermanagement von Stahlbetonbauwerken. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104 (11), S. 747–753.
- SCHMID, S. A. (2005). *Externe Kosten des Verkehrs: Grenz- und Gesamtkosten durch Luftschadstoffe und Lärm in Deutschland*. Dissertation, Universität Stuttgart.
- SCHMITT, V., SEIDL, G., VOGEL, C., SCHÜLKE, B. und KOCH, E. (2005). *Untersuchungen zum verstärkten Einsatz von Stahlverbundkonstruktionen bei Brücken kleiner und mittlerer Stützweiten*. Forschung für die Praxis P 629. Düsseldorf: Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V.
- SCHMUCK, A. (1987). *Straßenerhaltung mit System: Grundlagen des Managements*. Bonn: Kirschbaum.
- SCHNETGÖKE, R. (2008). *Zuverlässigkeitsorientierte Systembewertung von Massivbauwerken als Grundlage für die Bauwerksüberwachung*. Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 204. Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Dissertation.
- SCHOPHAUS, M., DIENEL, H. und BRAUN, C. von (2003). *Von Brücken und Einbahnstraßen: Aufgaben für das Kooperationsmanagement interdisziplinärer Forschung*. Discussion paper Nr. 08/03. Technische Universität Berlin, Zentrum Technik und Gesellschaft.
- SCHRÖDER, M. (2008). *Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung – Bewährung*. Heft B 60. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW.
- SEDLBAUER, K., WITTSTOCK, B. und FISCHER, M. (2011). Die Zukunft ist da – Nachhaltigkeit im Bauwesen. In: *wksb, Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz* 65, S. 54–60.
- SHIRES, J. und JONG, G. de (2006). An international meta-analysis of values of time: HEATCO Deliverable 5, Annex A. In: *Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment*. Stuttgart.

- SINGH, R., MURTY, H., GUPTA, S. und DIKSHIT, A. (2009). An overview of sustainability assessment methodologies. In: *Ecological Indicators* 9 (2), S. 189–212.
- SMEETS, E. und WETERING, R. (1999). *Environmental indicators: Typology and overview*. Technical report No. 25. European Environment Agency, Copenhagen.
- SPADARO, J. V. und RABL, A. (2008). Estimating the uncertainty of damage costs of pollution: A simple transparent method and typical results. In: *Environmental Impact Assessment Review* 28 (2-3), S. 166–183.
- SPENGLER, T., GELDERMANN, J., HÄHRE, S., SIEVERDINGBECK, A. und RENTZ, O. (1997). Multicriteria Decision Support System for Ecological Management. In: *Greener Management International* 18, S. 59–77.
- SPRIGG, A. (2012). Infrastructure Sustainability (IS) Rating Scheme. In: *The Australian Environmental Review* 2012 (2), S. 30–34.
- STERN, N. (2006). *Stern review: The Economics of Climate Change*. London: HM Thresury.
- STÖCKERT, R. und KLOTZ, S. (1999). *Sicherheit und Wirtschaftlichkeit von Arbeitsstellen kürzerer Dauer (Tagesbaustellen) auf Bundesautobahnen*. Schlussbericht zum Forschungsauftrag 03.285/1995/FR. Darmstadt: Fachgebiet Straßenwesen, TU Darmstadt.
- SÜMMERMANN, A. (2012). *Verkehrssicherheits- und Verkehrsablaufuntersuchungen in Arbeitsstellen längerer Dauer auf Autobahnen in Deutschland*. Aachen: RWTH Aachen, Dissertation.
- SZITAR, M. und GRECEA, D. (2011). Sustainable building assessment tools and the quality of the built environment. In: *Sustainability of Constructions: Towards a better built environment*. Hrsg. von L. BRAGANÇA, H. KOUKKARI, R. BLOK, M. GERVÁSIO, M. VELJKOVIC, R. BORG, R. LANDOLFO, V. UNGUREANU und C. SCHAUR. Malta: Gutenberg Press Ltd, S. 155–162.
- THOFT-CHRISTENSEN, P. (2009). Life-cycle cost-benefit (LCCB) analysis of bridges from a user and social point of view. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 5 (1), S. 49–57.
- THOMAS, O. (2009). *Fuzzy Process Engineering: Integration von Unschärfe bei der modellbasierten Gestaltung prozessorientierter Informationssysteme*. Wiesbaden: Gabler / GWV.
- TREIBER, M., KESTING, A. und THIEMANN, C. (2008). *How much does Traffic Congestion Increase Fuel Consumption and Emissions? Applying a Fuel Consumption Model to the NGSIM Trajectory Data*. TRB 87th Annual Meeting in Washington DC, 13-17 January 2008.
- TVERSKY, A. und KAHNEMAN, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. In: *Science* 185 (4157), S. 1124–1131.
- UBA (2007). *Ökonomische Bewertung von Umweltschäden: Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten*. Dessau: Umweltbundesamt, Fachgebiet Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen.



- UBA (2012). *Ökonomische Bewertung von Umweltschäden: Methodenkonvention 2.0 zur Schätzung externer Umweltkosten*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, Fachgebiet Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen.
- UN (2002). *Report of the World Summit on Sustainable Development*. United Nations publication A/CONF.199/20. New York: Johannesburg, South Africa, 26 August - 4 September 2002.
- UN (2007). *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*. New York: United Nations publication.
- UNCED (1993). *Agenda 21: Programme of action for sustainable development*. New York: United Nations Department of Public Information.
- UNITE (2003). *UNification of accounts and marginal costs for Transport Efficiency, Final Report*. No. 1999-AM.11157, Version 1.0. Leeds: Institute for Transport Studies (ITS), University of Leeds.
- UVEK (2003). *Externe Kosten des Verkehrs im Bereich Natur und Landschaft: Monetarisierung der Verluste und Fragmentierung von Habitaten*. Working Paper. Bern: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) und Bundesamt für Raumentwicklung.
- UGWU, O. und HAUPT, T. (2007). Key performance indicators and assessment methods for infrastructure sustainability—a South African construction industry perspective. In: *Building and Environment* 42 (2), S. 665–680.
- UGWU, O., KUMARASWAMY, M., WONG, A. und NG, S. (2006a). Sustainability appraisal in infrastructure projects (SUSAIP): Part 1. Development of indicators and computational methods. In: *Automation in Construction* 15 (2), S. 239–251.
- UGWU, O., KUMARASWAMY, M., WONG, A. und NG, S. (2006b). Sustainability appraisal in infrastructure projects (SUSAIP): Part 2: A case study in bridge design. In: *Automation in Construction* 15 (2), S. 229–238.
- UMMENHOFER, T. und ZINKE, T. (2015). Nachhaltigkeitsuntersuchungen von Korrosionsschutzsystemen im Brückenbau. In: *Moderner Korrosionsschutz mit Zukunft, Forschungskolloquium des Gemeinschaftsausschusses Feuerverzinken, Fulda, 23.-24. Juni 2015*. Hrsg. von GAV.
- VSS (2007). *Ermittlung repräsentativer Betriebskostensätze für Motorfahrzeuge zur Bewertung von Massnahmen im Strassenverkehr*. Berichtsnr. VSS 2005/205. Zürich: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrstechnik.
- VALENTIN, A. und SPANGENBERG, J. H. (2000). A guide to community sustainability indicators. In: *Environmental Impact Assessment Review* 20 (3), S. 381–392.
- VANZERR, M., CONNOLLY, S., SOWERBY, C., HARMER, C., FOLKESON, L., GUDMUNDSSON, H., VOS-EFFTING, S. de und LEEGWATER, G. (2012). *Sustainability Rating System Fra-*

- mework: Best Practices in Sustainability Rating Systems*. Deliverable 3.1. VTI - Swedish National Road and Transport Research Institute.
- VEIT-EGERER, R., WIDMANN, M., FURTNER, P. und LIMA, R. (2013). Integrated Assessment Tool for Highway Infrastructure. In: *Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Proceedings of the IABSE Conference, Rotterdam, Netherlands, 6-8 May 2013*. Hrsg. von IABSE, 62–63, Full text on DVD.
- VERHOEF, E., NIJKAMP, P. und RIETVELD, P. (1996). The trade-off between efficiency, effectiveness, and social feasibility of regulating road transport externalities. In: *Transportation Planning and Technology* 19 (3-4), S. 247–263.
- VOLLRATH, F. und TATHOFF, H. (2002). *Handbuch der Brückeninstandhaltung*. 2. Aufl. Düsseldorf: Verl. Bau + Technik.
- VOSS, A. (2001). *LCA and External Costs in Comparative Assessment of Electricity Chains – Decision Support for Sustainable Electricity Provision?* IEA Conference Energy Policy and Externalities: The Life Cycle Analysis Approach, Paris, 15-16 November 2001.
- WCD (2000). *Dams and Development: A new framework for decision-making ; The report of the World Commission on Dams*. Online-Ausg. London: Earthscan.
- WALL, C. E. und SCHNEIDER, F. (2012). *Volkswirtschaftliche Analyse der Errichtung von Infrastruktur: Berechnung und Ergebnisvergleich anhand zweier alternativer Brückenbauvarianten*. Vortrag im Rahmen des Seminars Perspektiven im Stahl(verbund)brückenbau am 01. März 2012. Wien: JKU Linz und ÖSTV.
- WALTER, F., GUBLER, F. und SOMMER, H. (2003). *NISTRA: Nachhaltigkeitsindikatoren für Strasseninfrastrukturprojekte: Ein Instrument zur Beurteilung von Strasseninfrastrukturprojekten unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsziele*. Bern/Altdorf: Ecoplan.
- WILLETTS, R., BURDON, J., GLAS, J. und FROST, M. (2010). Fostering sustainability in infrastructure development schemes. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 163 (3), S. 159–166.
- WITTSTOCK, B. (2012). *Methode zur Analyse und Beurteilung des Einflusses von Bauprodukt-eigenschaften auf die Nachhaltigkeitsbewertung im Rahmen der Zertifizierung von Gebäuden*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl.
- YAO, H., SHEN, L., TAN, Y. und HAO, J. (2011). Simulating the impacts of policy scenarios on the sustainability performance of infrastructure projects. In: *Automation in Construction*, S. 1060–1069.
- ZANGEMEISTER, C. (1971). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multi-dimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. 2. Aufl. München: Wittemannsche Buchhandlung, Dissertation.
- ZIERKE, B. (2010). *Sichere Gestaltung von Landstraßen durch definierte Straßentypen*. Berlin: Technische Universität Berlin, Dissertation.

- ZINKE, T. und UMMENHOFER, T. (2011). Sustainable Assessment of Bridges: Relevance of External Costs. In: *Eurosteel 2011, Proceedings of 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary, 31 August - 2 September 2011*. Hrsg. von L. DUNAI, M. IVÁNYI, K. JÁRMAI, N. KOVÁS und L. G. VIGH. Brussels: ECCS, S. 1953–1958.
- ZINKE, T. und UMMENHOFER, T. (2013). Uncertainty of Maintenance Strategies for Bridge Sustainability Assessment. In: *Assessment, Upgrading and Refurbishment of Infrastructures. Proceedings of the IABSE Conference, Rotterdam, Netherlands, 6-8 May 2013*. Hrsg. von IABSE, 66–67, Full text on DVD.
- ZINKE, T. und UMMENHOFER, T. (2014). Nachhaltigkeit und Resilienz – Zukünftige Kriterien bei der integrativen Bewertung von Brücken. In: *Stahlbau* 83 (2), S. 74–82.
- ZINKE, T., DIEHL, R., MENSINGER, M. und UMMENHOFER, T. (2010). Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken. In: *Stahlbau* 79 (6), S. 448–455.
- ZINKE, T., SCHMIDT-THRÖ, G. und UMMENHOFER, T. (2012a). Entwicklung und Verwendung von externen Kosten für die Nachhaltigkeitsbewertung von Verkehrsinfrastruktur. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 107 (8), S. 524–532.
- ZINKE, T., UMMENHOFER, T., PFAFFINGER, M. und MENSINGER, M. (2012b). The social dimension of bridge sustainability assessment – Impacts on users and the public. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Stresa, Italy, 8-12 July 2012*. Hrsg. von F. BIONDINI und D. FRANGOPOL. London: CRC Press, 365, Full text on DVD.



## Normen- und Richtlinienverzeichnis

- ABB-Ö (2002). *Vereinbarung zur Berechnung der Erhaltungskosten und Ablösungsbeträge von Ingenieurbauwerken, Straßen und Wegen*. Nummer 100/1/BA-A. HL-AG, asfinag und ÖBB.
- ABBV (2010). *Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge-Berechnungsverordnung)*. Drucksache 147/10. Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- ASB-ING (2008). *Anweisung Straßeninformationsbank, Teilsystem Bauwerksdaten: Sammlung Brücken- und Ingenieurbau*. Stand 03/2008. Dortmund: Verkehrsblatt-Verl.
- BZK (2009). *Bauzeitenkatalog zur Erstellung von Rahmenterminplänen für Erhaltungsmaßnahmen bei Autobahnen*. Stand 16.12.2009. Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung, Arbeitsgruppe „Bauzeitenverkürzung“.
- DIN 1076 (1999). *Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen – Überwachung und Prüfung*.
- DIN 276-4 (2009). *Kosten im Bauwesen – Teil 4: Ingenieurbau*.
- DIN 31051 (2012). *Grundlagen der Instandhaltung*.
- DIN EN 13306 (2010). *Instandhaltung – Begriffe der Instandhaltung*.
- DIN EN 15643-1 (2010). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen*.
- DIN EN 15643-2 (2011). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität*.
- DIN EN 15643-3 (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 3: Rahmenbedingungen für die Bewertung der sozialen Qualität*.
- DIN EN 15643-4 (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität*.
- DIN EN 15804 (2014). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*.
- DIN EN 15942 (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Kommunikationsformate zwischen Unternehmen*.
- DIN EN 15978 (2012). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode*.

- DIN EN 16309 (2014). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der sozialen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethoden.*
- DIN EN 16627 (2015). *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der ökonomischen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethoden.*
- DIN EN 1990 (2010). *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung.*
- DIN EN ISO 14025 (2010). *Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren.*
- DIN EN ISO 14040 (2009). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen.*
- DIN EN ISO 14044 (2006). *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.*
- DIN EN ISO 14050 (2010). *Umweltmanagement – Begriffe.*
- E DIN EN ISO 15392 (2011). *Nachhaltigkeit im Hochbau – Allgemeine Grundsätze.*
- EP (2004). *Directive 2004/18/EC. Coordination of procedures for the award of public works contracts, public supply contracts and public service contracts.* 31 March 2004. The European Parliament and the Council of the European Union.
- EP (2006). *Richtlinie 2006/38/EG. Erhebung von Gebühren für die Benutzung bestimmter Verkehrswege durch schwere Nutzfahrzeuge.* 17. Mai 2006. Richtlinie Nr. L 157/8 des Europäischen Parlaments.
- EWS (1997). *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen. Aktualisierung der RAS-W 86.* Ausgabe 1997. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.
- HVA B-STB (2009). *Handbuch für die Vergabe und Ausführung von Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau.* Ausgaben März 2009. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.
- ISO 13823 (2008). *General principles on the design for structures for durability.*
- ISO 15392 (2008). *Sustainability in building construction – General principles.*
- ISO 15686-2 (2008). *Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 2: Service life prediction procedure.*
- ISO 15686-4 (2014). *Building Construction – Service Life Planning – Part 4: Service Life Planning using Building Information Modelling.*
- ISO 15686-5 (2008). *Buildings and constructed assets – Service-life planning – Part 5: Life-cycle costing.*
- ISO 16745 (2015). *Environmental performance of buildings – Carbon metric of a building during the use stage – Part 1: Calculation, reporting and communication.*

- ISO 21929-1 (2011). *Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 1: Framework for the development of indicators and a core set of indicators for buildings.*
- ISO 21930 (2007). *Sustainability in building construction – Environmental declaration of building products.*
- ISO 21931-1 (2010). *Sustainability in building construction – Framework for methods of assessment of the environmental performance of construction works – Part 1: Buildings.*
- ISO/TR 21932 (2013). *Sustainability in buildings and civil engineering works – A review of terminology.*
- ISO/TS 21929-2 (2015). *Sustainability in building construction – Sustainability indicators – Part 2: Framework for the development of indicators for civil engineering works.*
- RI-EBW-PRÜF (2013). *Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076.* Stand 25.03.2013. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.
- RI-WI-BRÜ (2007). *Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken: Teil der Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauwerken.* Ausgabe 2007. Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung.
- VDI 3780 (2000). *Technikbewertung – Begriffe und Grundlagen.*

# 4

Brücken sind ein wichtiger Teil der Verkehrsinfrastruktur und ihre Funktionsfähigkeit ist Grundvoraussetzung für Mobilität und Warenverkehr. Für eine ganzheitliche Analyse müssen Aspekte wie die ökonomische und ökologische Leistungsfähigkeit im gesamten Lebenszyklus sowie Wechselwirkungen zwischen Bauwerk und Verkehr in Form von externen Effekten in die Entscheidungsfindung miteinbezogen werden. In dieser Arbeit wird ein Schwerpunkt auf genau diese Aspekte gelegt. Deshalb wird eine Methodik zur Berechnung von baustelleninduzierten externen Effekten entwickelt, um die Auswirkungen zwischen dem ungestörten Normalbetrieb und kapazitätsreduzierten Verkehrsführungen im Fall von Baustellen zu quantifizieren. Hierdurch findet eine deutliche Ausweitung der Systemgrenzen gegenüber den im Hochbau üblichen Analysen statt und es wird durch Beispielanwendungen gezeigt, dass für Verkehrsinfrastrukturen eine im Vergleich zu Hochbauten angepasste Bewertungssystematik verwendet werden muss.

