



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung

Instandhaltungsmanagement der materiellen Infrastruktur unter besonderer Berücksichtigung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte

Christian Ziegel

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Oliver Fischer

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Josef Zimmermann
2. Prof. Dr.-Ing. Hans Wilhelm Alfen
Bauhaus-Universität Weimar

Die Dissertation wurde am 17.09.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt am 28.01.2020 angenommen.

„Die [...] letzte Pflicht des [...] Staates ist die, solche Anstalten zu treffen und solche Werke herzustellen und zu unterhalten, die, wenn sie auch für eine große Nation höchst vorteilhaft sind, doch niemals einen solchen Gewinn abwerfen, daß sie einzelnen oder einer kleinen Anzahl von Personen auch nur die Kosten ersetzen, und deren Errichtung und Unterhaltung daher von keinem einzelnen und keiner kleinen Anzahl von Personen erwartet werden darf.“⁰

⁰ Adam Smith, *The Wealth of Nations*, 5. Buch, 2. Kapitel, zitiert nach der deutschen Übersetzung von Max Stirner, Leipzig 1910, Bd. 2, S. 179 f.

Inhaltsübersicht

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Formelverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

- 1 Einführung**
- 2 Forschungsgegenstand**
- 3 Stand der Forschung**
- 4 Forschungsbedarf**
- 5 Methodengnese für ein Instandhaltungsmanagement auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte**
 - a. Bewertung des Nutzens von Verkehr
 - b. Bewertung der Vernetzung von Funktionseinheiten
 - c. Definition von Kritikalität als Beurteilungskriterium einer gesamtwirtschaftlichen Instandhaltung
 - d. Genese von Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität
- 6 Modellentwicklung und Ableitung eines Instandhaltungsmanagements auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte**
 - a. Nutzen von Verkehr als sozioökonomischer Aspekt
 - b. Vernetzung von Funktionseinheiten als einzelwirtschaftlicher Aspekt
 - c. Kritikalitätsbestimmung auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Bedeutung
 - d. Ableitung von gemischten Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität
- 7 Ergebnisse der Arbeit**
- 8 Fazit & Ausblick**

Glossar

Literaturverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		I
Abbildungsverzeichnis		V
Tabellenverzeichnis		IX
Formelverzeichnis		XI
Abkürzungsverzeichnis		XIII
1	Einführung	1
1.1	Forschungsgegenstand	4
1.2	Problemstellung	6
1.3	Zielsetzung und Methodik	11
1.4	Aufbau der Arbeit	15
2	Forschungsgegenstand	19
2.1	Der Begriff der Infrastruktur	19
2.2	Infrastruktur als Immobilie	21
2.3	Kritische Infrastrukturen	21
2.4	Funktion der (technischen) Infrastruktur	23
3	Grundlagen und Stand der Forschung	25
3.1	Ökonomische Bewertung von Infrastrukturprojekten	25
3.1.1	Wohlfahrtsökonomische Betrachtung	26
3.1.2	Der Begriff des Nutzens	29
3.1.3	Messung des Nutzens bzw. Wohlstands	31
3.1.4	Vergleich und Untersuchung von Wirtschaftlichkeit	32
3.1.5	Kosten-Nutzen-Analyse	33
3.1.6	Variablen einer Nutzenbestimmung am Beispiel der Verkehrsinfrastruktur	36
3.1.7	Anwendung wirtschaftlicher Bewertung von Infrastrukturerhaltungsmaßnahmen	39
3.2	Grundlagen/Kritikalität in der Zuverlässigkeitssystemtheorie	40
3.2.1	Der Begriff der Kritikalität	41
3.2.2	Kritikalität (-analysen) und deren Anwendungsbereiche	42
3.2.2.1	Kritikalität in der Kernphysik	42
3.2.2.2	Kritikalität im IT-(Krisen-)management	43
3.2.2.3	Kritikalität in der Luft- und Raumfahrt	44
3.2.2.4	Kritikalität in der teilautomatisierten Fahrzeugführung	45
3.2.3	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FME(C)A)	46
3.2.4	Kritikalitätsbeurteilung in DIN EN 60812	47
3.2.4.1	Kritikalität(-sbeurteilung) bei komplexen reparierbaren Systemen	47
3.2.4.2	Kritikalitätsbeurteilungsmethoden	48
3.2.4.2.1	Kritikalitätsmatrix	48
3.2.4.2.2	Risikoprioritätszahl	50
3.2.5	Kritikalität in der Infrastruktur(-forschung)	52
3.2.6	Vernetzungsanalyse (Cross-Impact-Analyse)	53
3.2.6.1	Grundlagen der Systemtheorie und Kybernetik	54
3.2.6.2	Vernetzungsanalyse nach Vester	55
3.3	Begriffe der Instandhaltung	61
3.3.1	Ziele der Instandhaltung	62
3.3.2	Lebensdauer von Bauteilen	63

Inhaltsverzeichnis

3.3.2.1	Gesamtnutzungsdauer	63
3.3.2.2	Technische Gesamtnutzungsdauer	63
3.3.2.3	Wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer	64
3.3.2.4	Restnutzungsdauer	64
3.3.3	Beschreibung der Alterung durch Abnutzung	65
3.3.3.1	Abnutzungsvorrat	66
3.3.3.2	Materielle Abnutzung	66
3.3.3.3	Immaterielle Abnutzung	67
3.3.4	Beschreibung der Alterung durch Zeitdauern	68
3.3.5	Instandhaltungsbedarf und Instandhaltungsrückstau	69
3.3.6	Maßnahmen der Instandhaltung	70
3.3.6.1	Wartung	70
3.3.6.2	Inspektion	71
3.3.6.3	Instandsetzung	72
3.3.6.4	Verbesserung	74
3.3.7	Arten der Instandhaltung	75
3.3.8	Strategien der Instandhaltung	77
3.3.8.1	Präventive Instandhaltungsstrategien	78
3.3.8.1.1	Vorausbestimmte	78
3.3.8.1.2	Zustandsorientierte	79
3.3.8.1.3	Zustandsorientierte, voraussagende	79
3.3.8.2	Korrektive Instandhaltungsstrategien	80
3.3.8.2.1	Sofortige	80
3.3.8.2.2	Aufgeschobene	80
3.3.8.3	Resümee	81
3.3.9	Instandhaltung in der Verkehrsinfrastruktur	81
3.3.9.1	RPE-Str 01 – Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen	82
3.3.9.2	FGSV AP 9 – Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung	85
3.3.9.3	VDI-Richtlinien	87
3.3.9.4	Sonstige Literatur	88
3.3.9.5	PMS – Pavement Management System	88
3.4	Bedeutung für die weitere Arbeit	90
4	Forschungsbedarf	95
4.1	Zeitliche Auswirkungen der Herstellung auf die zukünftigen Kosten	97
4.2	Auswirkungen der Belastung auf die zukünftigen Kosten	100
4.3	Einfluss der Instandhaltungsstrategie auf die Kosten	102
4.4	Allokation der begrenzten Ressourcen	104
4.5	Bewertung der Zustandsgröße als Indikator für Erhaltungsmaßnahmen	105
5	Methodengenerese für ein Instandhaltungsmanagement auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte	107
5.1	Bewertung des Nutzens von Verkehr	107
5.1.1	Makroskopische Verkehrsbetrachtung	108
5.1.2	Der Leistungsbegriff auf Basis der Realdaten	109
5.1.2.1	Theoretische und tatsächliche Leistungsfähigkeit einer Straße	109
5.1.2.2	Tatsächliche (erbrachte) Leistung im zeitlichen Verlauf	112
5.1.3	Darstellung eines Netzabschnittes als Graph	113
5.1.4	Herleitung einer Kenngröße zur Verkehrsnutzenbeschreibung	116
5.1.4.1	Herleitung der auftretenden Zustände/Fälle	117
5.1.4.1.1	Fall 0	117
5.1.4.1.2	Fall 1 – geänderte Geschwindigkeit	117
5.1.4.1.3	Fall 2 – geänderte Menge	118
5.1.4.1.4	Fall 3 – geänderte Geschwindigkeit und Menge	118
5.1.4.2	Formelzusammenstellungen samt Differenzen	118
5.1.5	Unterscheidung der zeitlichen Aufkommen	120

Inhaltsverzeichnis

5.1.5.1	Theoretische Unterscheidungsmöglichkeiten	121
5.1.5.2	Praktische Umsetzungsmöglichkeiten	122
5.1.5.3	Bedeutung des Zeitpunktes von Maßnahmen	123
5.1.6	Unterscheidung der einzelnen Fahrzeuge	125
5.1.6.1	Theoretische Unterscheidungsmöglichkeiten nach wirtschaftlichem Sinn	125
5.1.6.2	Praktische Umsetzungsmöglichkeiten	125
5.1.7	Zusammenfassung	127
5.2	Analyse der Vernetzung von Funktionseinheiten	128
5.2.1	Herleitung Funktionseinheiten	129
5.2.1.1	Straßeninfrastruktur	130
5.2.1.2	Brücken	132
5.2.1.3	Tunnel	134
5.2.2	Definition des Funktionsbetriebs	136
5.2.2.1	Herleitung der Einschränkungen	137
5.2.2.1.1	Keine Einschränkung (E0)	138
5.2.2.1.2	Herabsetzung der Geschwindigkeit (E1)	139
5.2.2.1.3	Teilspernung der Fahrbahn (E2)	139
5.2.2.1.4	Vollsperrung der Fahrbahn (E3)	139
5.2.3	Bestimmung des systemimmanenten/petalen Einflusses (der FE)	139
5.2.4	Bestimmung des fughalen Einflusses (der FE)	140
5.2.5	Verknüpfung des petalen und fughalen Einflusses	141
5.2.6	Ableitung einer Hierarchie	147
5.3	Definition von Kritikalität als Beurteilungskriterium einer gesamtwirtschaftlichen Instandhaltung	148
5.3.1	Zeitliche Betrachtung der Instandhaltung	149
5.3.1.1	Hierarchische Struktur im Anlagenbetrieb	149
5.3.1.2	Zeitliche Zusammenhänge im Anlagenbetrieb	151
5.3.1.3	Sonderfall bei ständiger geforderter Nutzungszeit	154
5.3.2	Zusammenhang der Instandhaltungsstrategien	155
5.3.3	Verknüpfung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Betrachtung	158
5.3.3.1	Herleitung eines Kritikalitätsmaßes	158
5.3.3.2	Qualitative Diskussion des Maßes	160
5.3.3.3	Interpretation des Kritikalitätsmaßes	162
5.4	Genese von Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität	163
6	Modellentwicklung und Ableitung eines Instandhaltungsmanagements auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte	167
6.1	Nutzen von Verkehr als sozioökonomischer Aspekt	167
6.1.1	Bewertung der wirtschaftlichen Ausfallbedeutung eines Objektes	167
6.1.1.1	Statische Bewertung	169
6.1.1.2	Dynamische Bewertung	170
6.1.2	Nutzenkomponenten und deren Erfassung/Beschreibung	171
6.1.3	Analyse der logischen Beschaffenheit der Nutzenkomponenten	173
6.1.3.1	Abhängigkeiten der Komponenten in Bezug auf die Geometrie	173
6.1.3.2	Abhängigkeiten der Komponenten infolge von Veränderungen	174
6.1.4	Bestimmung der Ausfallbedeutung der Verkehrsinfrastruktur und deren Objekte	177
6.1.5	Änderung der Leistungsfähigkeit infolge einer Einschränkung	181
6.1.5.1	Uneingeschränkter Fall (Status quo ante)	181
6.1.5.2	Eingeschränkter Fall (Status quo post)	182
6.1.5.3	Beeinflussung der Bedeutung infolge einer Einschränkung	184
6.1.6	Wirtschaftliche Bedeutung der Verkehrsinfrastruktur	186
6.1.6.1	Bewertung der Straßeninfrastruktur	189
6.1.6.1.1	Bestimmung der Leistung nach Querschnitt (gesamte Fahrbahn)	189
6.1.6.1.2	Ableitung einer hierarchischen Ordnung der Querschnitte	194
6.1.6.2	Bewertung der Ingenieurbauwerke	198
6.1.6.2.1	Leistungsbewertung für Tunnel	198
6.1.6.2.2	Leistungsbewertung für Brücken	201
6.1.6.2.3	Bedeutung der Ingenieurbauwerke für längenbezogene Leistungsbestimmung	208

Inhaltsverzeichnis

6.2	Vernetzung von Funktionseinheiten als einzelwirtschaftlicher Aspekt	209
6.2.1	Straße	209
6.2.1.1	Bewertung der Einflüsse der Funktionseinheiten	210
6.2.1.2	Ableitung der Hierarchie bewerteter Funktionseinheiten	211
6.2.2	Brücke	214
6.2.2.1	Bewertung der Einflüsse der Funktionseinheiten	214
6.2.2.2	Ableitung der Hierarchie bewerteter Funktionseinheiten	215
6.2.3	Tunnel	218
6.2.3.1	Bewertung der Einflüsse der Funktionseinheiten	218
6.2.3.2	Ableitung der Hierarchie bewerteter Funktionseinheiten	219
6.3	Kritikalitätsbestimmung auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Bedeutung	223
6.3.1	Instandhaltung als Interpretation der Hierarchie der Straßeninfrastruktur	223
6.3.2	Instandhaltung als Interpretation der Hierarchie der Brückeninfrastruktur	226
6.3.3	Instandhaltung als Interpretation der Hierarchie der Tunnelinfrastruktur	228
6.3.4	Überlagerung der Bauwerke zu einem Verkehrsträger	229
6.4	Ableitung von gemischten Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität	230
6.4.1	Resultierende Strategien im Umfeld differenzierter Kritikalität	232
6.4.1.1	Genese einer Instandhaltungsstrategie unter Berücksichtigung gegebener Grenzen	232
6.4.1.2	Genese von Grenzwerten unter Berücksichtigung gegebener Mittel	234
6.4.1.3	Auswirkungen geänderter Leistung an definiten Objekten	240
6.4.2	Instandhaltung auf Basis der Ausfallbedeutung	241
6.4.2.1	Ausfallbedeutung eines Infrastrukturobjektes (am Beispiel der Rheinbrücke Leverkusen im Zuge der BAB 1)	241
6.4.2.2	Auswirkung zeitlicher Verschiebungen der Maßnahmen	243
7	Ergebnisse der Arbeit	249
7.1	Leistung an den Objekten der Verkehrsinfrastruktur	249
7.2	Einflüsse und Vernetzung der Funktionseinheiten der Verkehrsinfrastrukturobjekte	253
7.3	Bestimmung eines Kritikalitätsmaßes	255
7.4	Ableitung einer optimierten Instandhaltungsstrategie	258
7.5	Zusammenfassung	262
8	Schlussbemerkungen	267
8.1	Zusammenfassung	267
8.2	Ausblick	268
8.3	Empfehlungen für weiteren Forschungsbedarf	270
Glossar		271
Literaturverzeichnis		275

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Abgrenzung des Themengebietes	10
Abbildung 1-2: Zweidimensionale Betrachtung von Aspekten mit einer qualitativen Wertung	11
Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit	17
Abbildung 2-1: Kategorien der Infrastruktur	20
Abbildung 2-2: Nachhaltigkeit von Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen nach BMI	23
Abbildung 3-1: Resultierende Renten bei qualitativer Angebots- (A) und Nachfragefunktion (N)	27
Abbildung 3-2: Auswirkungen durch Alternative A*	28
Abbildung 3-3: Verteilung der möglichen Risikoprioritätszahlen (aufsteigend)	51
Abbildung 3-4: Verlauf der RPZ bei Änderung eines Parameters in Abhängigkeit von den Verbliebenen	51
Abbildung 3-5: Beispiel einer Kriterienmatrix	56
Abbildung 3-6: Beispiel einer Konsensmatrix	57
Abbildung 3-7: Interpretation der Rollenverteilung	59
Abbildung 3-8: Organigramm Instandhaltungsmanagement	62
Abbildung 3-9: Zusammenhang zwischen Alter, Rest- und Gesamtnutzungsdauer	63
Abbildung 3-10: Arten der Abnutzung	65
Abbildung 3-11: Exemplarischer Abbau eines Abnutzungsvorrates	66
Abbildung 3-12: Einflüsse auf das materielle Alterungsverhalten eines Bauteils	67
Abbildung 3-13: Einflüsse auf die immaterielle Abnutzung des Gebäudes	68
Abbildung 3-14: Maßnahmen am Gebäude zu dessen Erhaltung und Veränderung	70
Abbildung 3-15: Beispielhafter Verlauf der Abbaukurve des Abnutzungsvorrats unter Berücksichtigung von Wartungsmaßnahmen	71
Abbildung 3-16: Beispielhafter Verlauf der Abbaukurve des Abnutzungsvorrats unter Berücksichtigung von Instandsetzungsmaßnahmen	72
Abbildung 3-17: Abgrenzung Instandsetzung nach Zimmermann	74
Abbildung 3-18: Beispielhafter Verlauf der Abbaukurve des Abnutzungsvorrats unter Berücksichtigung von Verbesserungsmaßnahmen	75
Abbildung 3-19: Instandhaltungsarten nach DIN EN 13306 (2015)	77
Abbildung 3-20: Instandhaltungsstrategien	78
Abbildung 3-21: Qualitative Matrix des Zusammenhangs der unterschiedlichen Ausfallbedeutung	91
Abbildung 3-22: Wirtschaftliche Prozesskette und resultierender Prozess der Infrastruktur	93
Abbildung 4-1: Entwicklung der deutschen Autobahninfrastruktur ab 1950 (in km)	97
Abbildung 4-2: Jährlicher Zuwachs der deutschen Autobahninfrastruktur ab 1950 (in km)	98
Abbildung 4-3: Gleitender Durchschnitt des jährlichen Zuwachses der deutschen Autobahninfrastruktur ab 1950 (in km)	98
Abbildung 4-4: Jährliche Investitionskosten (qualitativ) mit $J = 50$	99
Abbildung 4-5: Jährliche Fahrleistung in Mrd. km bis 2014 (neue Bundesländer ab 1995)	100
Abbildung 4-6: DTV _{SV} auf deutschen Autobahnen 2016, gemittelt nach Fahrtrichtung	101
Abbildung 4-7: Vergleich der Soll-Investitionen aus dem Haushaltsplan sowie der berechneten Werte (Bundesautobahnen)	102
Abbildung 4-8: Vergleich der Soll-Investitionen aus dem Haushaltsplan sowie der berechneten Werte (Bundesstraßen)	103
Abbildung 5-1: DTV je Stunde und Fahrspur in Abhängigkeit vom Schwerlastverkehr	110
Abbildung 5-2: Qualitative Ausgleichsgerade zu den maximalen Verkehrsstärken	110
Abbildung 5-3: Darstellung des Verlaufs der maximalen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	111
Abbildung 5-4: Einfache Darstellung von drei Alternativen	114
Abbildung 5-5: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Zeit und Länge	120
Abbildung 5-6: Tagesganglinientypen des Kfz-Verkehrs – Montag	123
Abbildung 5-7: Verkehrsentwicklung über eine Woche	123
Abbildung 5-8: Darstellung der Einschränkung bei sofortiger Behebung	124
Abbildung 5-9: Darstellung der Einschränkung bei aufgeschobener Behebung	124
Abbildung 5-10: Darstellung des Prozesses der Hierarchiegenese	128
Abbildung 5-11: Kausaler Zusammenhang der Elemente der Hierarchiegenese	129
Abbildung 5-12: Querschnitt einer Straße mit den Funktionseinheiten	132
Abbildung 5-13: 3-Dimensionale Darstellung der Funktionseinheiten einer Straßenverkehrsbrücke	134
Abbildung 5-14: Längsschnitt einer Brücke mit Funktionseinheiten	134
Abbildung 5-15: Querschnitt eines Tunnels mit Funktionseinheiten	136

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-16: Abgrenzung der Einflussstärken im petalen Bereich	140
Abbildung 5-17: Abgrenzung der Einflussstärken im fugalen Bereich	141
Abbildung 5-18: Darstellung der Funktionseinheiten in Abhängigkeit vom Einfluss auf den Funktionsbetrieb als Quelle eines Transformationsprozesses.....	142
Abbildung 5-19: Verknüpfung der Einflüsse mittels Addition (links) und Multiplikation (rechts).....	143
Abbildung 5-20: Verknüpfung mittels gewichteter, individueller Addition mit anschließender Normierung mit x von (90 %, 60 %, 30 %, 0 %).....	145
Abbildung 5-21: Gegenüberstellung der nicht gewichteten (rot) und gewichteten (grün) Addition	146
Abbildung 5-22: Gegenüberstellung der nicht gewichteten (rot) und gewichteten (grün) Addition vor dem Ursprung (gelb).....	146
Abbildung 5-23: Darstellung der Verteilung der verknüpften Funktionseinheiten in aktive (vertikal) und passive (horizontale) Richtung	147
Abbildung 5-24: Darstellung der Rangfolge der Funktionseinheiten aufsteigend von links nach rechts .	148
Abbildung 5-25: Darstellung der Bedeutung der Funktionseinheiten (aufsteigend sortiert).....	148
Abbildung 5-26: Allgemeine Form des Betriebskreises.....	150
Abbildung 5-27: Sollbetrieb einer fiktiven technischen Anlage	151
Abbildung 5-28: Istbetrieb einer fiktiven technischen Anlage.....	153
Abbildung 5-29: Betrieb bei permanent geforderter Nutzungszeit (rechts mit Störung)	154
Abbildung 5-30: Qualitative Abhängigkeit zwischen den Kosten der Instandhaltung und den Ausfallfolgen	156
Abbildung 5-31: Restpotential in Abhängigkeit von der geforderten Zuverlässigkeit.....	156
Abbildung 5-32: Vergleich der vier Strategien hinsichtlich vier Aspekten	157
Abbildung 5-33: Koordinatenform der (nicht normierten) Kritikalitätsmatrix.....	160
Abbildung 5-34: Abstandsbeziehungen zum Ursprung in der (nicht normierten) Kritikalitätsmatrix	161
Abbildung 5-35: Abstandsbeziehungen zum Ursprung in der normierten Kritikalitätsmatrix	162
Abbildung 5-36: Zusammenhang zwischen Instandhaltungsstrategie und Kritikalitätsmaß	164
Abbildung 5-37: Darstellung der Quantile als Grenzen der Instandhaltung innerhalb des Kritikalitätsmaßes	165
Abbildung 5-38: Farblicher Zusammenhang innerhalb der Grenzen der Instandhaltung innerhalb des Kritikalitätsmaßes	166
Abbildung 6-1: Allgemeines Vorgehen zur Bewertung der Ausfallbedeutung eines Objektes.....	169
Abbildung 6-2: Überführung der Einheiten in die Funktionen der Fahrzeuggruppen.....	172
Abbildung 6-3: Änderung der Kosten infolge der Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrdauer	174
Abbildung 6-4: Änderung der Kosten infolge der Geschwindigkeitsbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrdauer.....	175
Abbildung 6-5: Änderung der Kosten infolge gleichzeitiger Geschwindigkeits- und Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrdauer	175
Abbildung 6-6: Skalierte Änderung der Kosten infolge gleichzeitiger Geschwindigkeits- und Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrdauer.....	176
Abbildung 6-7: Vorgehen zur Bewertung einer Nutzendifferenz infolge einer bestimmten Einschränkung	177
Abbildung 6-8: Graphische Verteilung der Anteile der Kosten an den Nutzengruppen	183
Abbildung 6-9: Gesamtbetrachtung der Änderung der Kosten infolge einer Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrdauer	185
Abbildung 6-10: Gesamtbetrachtung der Änderung der Kosten infolge einer Geschwindigkeitsbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrdauer	185
Abbildung 6-11: Leistung des Schwerlastverkehrs, aufsteigend sortiert (links) und die entsprechende Verteilung (rechts)	190
Abbildung 6-12: Leistung des Normallastverkehrs, aufsteigend sortiert (links) und die entsprechende Verteilung (rechts)	190
Abbildung 6-13: Leistung des gesamten Verkehrs, aufsteigend sortiert (links) und die entsprechende Verteilung (rechts)	191
Abbildung 6-14: Leistung des gesamten Verkehrs, aufsteigend sortiert, differenziert nach Normallast- und Schwerlastverkehr	192
Abbildung 6-15: Darstellung der Leistung (links) bzw. der Mengen (rechts) des gesamten Verkehrs in anteiliger Abhängigkeit vom Schwerlastverkehr, absteigend sortiert.....	192
Abbildung 6-16: Bereiche größten Anteils des Schwerlastverkehrs an der Gesamtleistung (Anteil ab 50 %)	193
Abbildung 6-17: Verteilung der Leistung über die Zählstellen in Abhängigkeit von den Querschnitten (links) sowie deren Häufung (rechts).....	194

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 6-18: Heatmap der abgewickelten Leistung des gesamten Verkehrs.....	195
Abbildung 6-19: Verteilung der Längen deutscher Autobahntunnel (exkl. Rennsteigtunnel bei 7.916 m).....	198
Abbildung 6-20: Verteilung der Leistung des gesamten Verkehrs in Tunnelbauwerken	199
Abbildung 6-21: Heatmap der abgewickelten Leistung des gesamten Verkehrs innerhalb der Tunnelbauwerke	200
Abbildung 6-22: Verteilung der deutschen Autobahnbrücken in Abhängigkeit von ihrer Länge.....	202
Abbildung 6-23: Ganglinie der Leistung über die Bundesautobahn 7 von Süden nach Norden (via Breitengrad).....	203
Abbildung 6-24: Heatmap der Brücken (> 10 m) der BAB 7	204
Abbildung 6-25: Darstellung der Brückenbauwerke nach Leistung mit einer Länge ab 500 m	206
Abbildung 6-26: Darstellung längenbezogener Betrachtung.....	209
Abbildung 6-27: Fugaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert)	211
Abbildung 6-28: Petaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal	212
Abbildung 6-29: Verknüpfter Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal	213
Abbildung 6-30: Hierarchische Darstellung der Funktionseinheiten (steigend von links nach rechts)	213
Abbildung 6-31: Verhältnismäßiger Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten	213
Abbildung 6-32: Fugaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert)	216
Abbildung 6-33: Petaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal	216
Abbildung 6-34: Verknüpfter Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal	217
Abbildung 6-35: Hierarchische Darstellung der Funktionseinheiten (steigend von links nach rechts)	218
Abbildung 6-36: Verhältnismäßiger Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten	218
Abbildung 6-37: Fugaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert)	220
Abbildung 6-38: Petaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal	221
Abbildung 6-39: Verknüpfter Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal	221
Abbildung 6-40: Hierarchische Darstellung der Funktionseinheiten (steigend von links nach rechts)	222
Abbildung 6-41: Verhältnismäßiger Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten	222
Abbildung 6-42: Kritikalitätsmatrix der BAB (mind. 5 Zählstellen).....	224
Abbildung 6-43: Darstellung der empfohlenen Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität.....	225
Abbildung 6-44: Kritikalitätsmatrix der Brücken an BAB (mind. 5 Zählstellen)	226
Abbildung 6-45: Darstellung der empfohlenen Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität.....	227
Abbildung 6-46: Kritikalitätsmatrix der Tunnel an BAB (mind. 5 Zählstellen).....	228
Abbildung 6-47: Darstellung der empfohlenen Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität.....	229
Abbildung 6-48: Resultierende Mischstrategie bei gegebenen Grenzwerten	233
Abbildung 6-49: Verlauf der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen	237
Abbildung 6-50: Änderung der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen	238
Abbildung 6-51: Kumulierte Änderung der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen	239
Abbildung 6-52: Kosten der Instandhaltung auf Basis der Kritikalität in Abhängigkeit vom Objekt	240
Abbildung 6-53: Fahrzeugmenge über 168 Stundenwerte einer Woche	243
Abbildung 6-54: Zusätzlich abzuwickelnde Zeit des Verkehrs für beide Varianten	244
Abbildung 6-55: Zusätzlich abzuwickelnde Länge des Verkehrs für beide Varianten	245
Abbildung 6-56: Volkswirtschaftliche Kosten während der Einschränkung	246
Abbildung 6-57: Kumulation der zusätzlich abzuwickelnden Zeit des Verkehrs für beide Varianten	246
Abbildung 6-58: Kumulation der zusätzlich abzuwickelnden Länge des Verkehrs für beide Varianten ..	247
Abbildung 6-59: Kumulation der volkswirtschaftlichen Kosten während der Einschränkung.....	247
Abbildung 7-1: Ausfallbedeutung im Netzabschnitt N für Objekt O infolge Ausfallereignis E	249
Abbildung 7-2: Leistungsberechnung für Netzabschnitte und Ableitung der Hierarchie.....	251
Abbildung 7-3: Leistung des Verkehrs auf deutschen Bundesautobahnen	253
Abbildung 7-4: Ablauf der Vernetzungsanalyse zur Ableitung der Hierarchie	254
Abbildung 7-5: Einfluss der Funktionseinheiten	255
Abbildung 7-6: Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten	255
Abbildung 7-7: Ablauf der Kritikalitätsbestimmung und Ableitung des Kritikalitätsmaßes	256
Abbildung 7-8: Kritikalitätsmatrix der Brücken an BAB (mind. 5 Zählstellen)	257
Abbildung 7-9: Zusammenhang zwischen Instandhaltungsstrategie und Kritikalitätsmaß	258
Abbildung 7-10: Erzeugung der resultierenden Instandhaltungsstrategie	259

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 7-11: Empfohlene Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität.....	260
Abbildung 7-12: Häufigkeit der Strategien je Funktionseinheit bei gegebenem Budget	261
Abbildung 7-13: Resultierende Mischstrategie bei gegebenen Grenzwerten	261
Abbildung 7-14: Verlauf der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen.....	262
Abbildung 7-15: „Triage für Instandhaltung“ am Beispiel der BAB 3, 5, 1, 7.....	264
Abbildung 7-16: Gesamtablauf über alle Teilbereiche	266

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Sektoren- und Brancheneinteilung kritischer Infrastrukturen nach BMI.....	22
Tabelle 3-1: Exemplarische Abstufungen der Auswirkungen.....	49
Tabelle 3-2: Beispielhafte Kritikalitätsmatrix.....	50
Tabelle 3-3: Bewertung der Ausprägungen verschiedener Attribute der Strategien.....	81
Tabelle 3-4: Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung.....	83
Tabelle 3-5: Übersicht über relevante VDI-Richtlinien	87
Tabelle 3-6: Literatur zur Zustandsbewertung und Erhaltung	88
Tabelle 5-1: Typische Verteilung des Verkehrs in Abhängigkeit vom Ganglinientyp (Montag)	113
Tabelle 5-2: Unterscheidung der Veränderlichen in Abhängigkeit von den Fällen	117
Tabelle 5-3: Fahrzeugartenerfassung an Zählstellen nach Gerätetyp.....	126
Tabelle 5-4: Auszug der Richtlinien und Regelwerke für die Beschreibung von Funktionseinheiten	130
Tabelle 5-5: Für den Erhalt relevante Leistungsbereiche nach STLK für Straßen	131
Tabelle 5-6: Funktionseinheiten einer Straße	132
Tabelle 5-7: Funktionseinheiten einer Straßenverkehrsbrücke.....	133
Tabelle 5-8: Funktionseinheiten eines Straßenverkehrstunnel.....	135
Tabelle 6-1: Darstellung der Nutzenkomponenten samt Bezugseinheiten in Konformität zur EWS	172
Tabelle 6-2: Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten ohne Einschränkung	182
Tabelle 6-3: Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten mit Einschränkung I.....	183
Tabelle 6-5: Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten mit Einschränkung II.....	184
Tabelle 6-6: Fahrzeugtypen und -gruppen für die verschiedenen Daten- und Kostensätze	187
Tabelle 6-7: Autobahnzählstellen nach abgewickelter Gesamtleistung (absteigend sortiert, Ausschnitt).....	196
Tabelle 6-8: Autobahnen nach abgewickelter durchschnittlicher Gesamtleistung (mind. 5 Messpunkte; absteigend sortiert).....	197
Tabelle 6-9: Tunnel nach abgewickelter durchschnittlicher Gesamtleistung (absteigend sortiert)	201
Tabelle 6-10: Hierarchische Ordnung der 75 ersten Bauwerke der Teilmenge (BAB 7).....	205
Tabelle 6-11: Ausschnitt der Hierarchie der Brückenbauwerke ab 500 m (1 – 75)	207
Tabelle 6-12: Exemplarische Darstellung der Handlungsempfehlung für die Bundesautobahnen 3, 5, 1, 7, 60, 62.....	231
Tabelle 6-13: Gewählte Strategien in Abhängigkeit von Funktionseinheit und Kritikalitätsgrenze	234
Tabelle 6-14: Vergleich der Mischstrategie und der vier „klassischen“ Strategien	234
Tabelle 6-15: Optimierter Strategienmix in Abhängigkeit von den gegebenen Kostengrenzen	239
Tabelle 6-16: Strategienmix der einzelnen Objekte in Abhängigkeit von der individuellen Kritikalität.....	241
Tabelle 6-17: Monetäre Bewertung des Ausfalls der Rheinbrücke BAB 1 (pro Tag).....	242
Tabelle 7-1: Hierarchie der Autobahnen nach durchschnittlicher Leistung (mind. 5 Messpunkte).....	252

Formelverzeichnis

Formel 3-1: Effizienz als Relation zwischen Out- und Input.....	30
Formel 3-2: Nettobarwert.....	35
Formel 3-3: Quotient aus Nutzen und Kosten als Unterscheidungsmerkmal	35
Formel 3-4: Aktivsumme.....	57
Formel 3-5: Passivsumme.....	58
Formel 3-6: Quotient Q.....	58
Formel 3-7: Produkt P	58
Formel 3-8: Bildung der Quotientendrittelung	59
Formel 3-9: Bildung der Produktendrittelung.....	60
Formel 3-10: Berechnung einer Adjazenzmatrix höherer Ordnung	61
Formel 3-11: Bestimmung der Restnutzungsdauer	64
Formel 5-1: Verkehrsstärke q in Abhängigkeit von Länge und Geschwindigkeit.....	111
Formel 5-2: Grenzwert der Verkehrsstärke für $v \rightarrow \infty$	111
Formel 5-3: Maximaler Fluss des Netzwerks	114
Formel 5-4: Aktueller Fluss des Netzwerks.....	115
Formel 5-5: Verbleibender potentieller Fluss des Netzwerks.....	115
Formel 5-6: Zusammenhang des aktuellen Flusses innerhalb des Netzwerks.....	115
Formel 5-7: Zusammenhang des maximalen Flusses innerhalb des Netzwerks.....	115
Formel 5-8: Nutzen in Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung	116
Formel 5-9: Nutzen mehrerer Abschnitte in Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung.....	116
Formel 5-10: Bewerteter Nutzen mehrerer Abschnitte in Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung ..	117
Formel 5-11: Verlust an Nutzen bei Fall 1.....	118
Formel 5-12: Verlust an Nutzen bei Fall 2.....	119
Formel 5-13: Verlust an Nutzen bei Fall 3.....	119
Formel 5-14: Verlust an Nutzen bei einer Netzbetrachtung	119
Formel 5-15: Bewerteter Verlust an Nutzen bei einer Netzbetrachtung	120
Formel 5-16: Auswirkung des Zeitpunkts einer Maßnahme auf den Nutzen	121
Formel 5-17: Verknüpfung mittels Addition mit anschließender Normierung.....	142
Formel 5-18: Verknüpfung mittels Multiplikation mit anschließender Normierung.....	143
Formel 5-19: Verknüpfung mittels gewichteter Addition mit anschließender Normierung	144
Formel 5-20: Verknüpfung mittels gewichteter Multiplikation mit anschließender Normierung	144
Formel 5-21: Verknüpfung mittels gewichteter, individueller Addition mit anschließender Normierung ..	145
Formel 5-22: Kritikalitätsvektor für eine zweidimensionale Kritikalitätsanalyse	158
Formel 5-23: Definition der Kritikalitätsmatrix als doppelt indizierte Familie	158
Formel 5-24: Zuordnung der Elemente zu Vektoren als Indizes der Matrix.....	158
Formel 5-25: Kritikalitätsmatrix als Verallgemeinerung der Kritikalitätsvektoren	159
Formel 5-26: Allgemeiner normierter Kritikalitätsvektor einer zweidimensionalen Kritikalitätsanalyse....	159
Formel 5-27: Definition des maximalen Kritikalitätsvektors.....	159
Formel 5-28: Normierter Kritikalitätsvektor einer zweidimensionalen Kritikalitätsanalyse	159
Formel 5-29: Darstellung der normierten Kritikalitätsmatrix	160
Formel 5-30: Kritikalitätsintervall des Kritikalitätsmaßes	160
Formel 5-31: Interpretation der Instandhaltungsstrategien durch Quantile als Grenzwerte	166
Formel 6-1: Wirtschaftliche Bedeutung als Summe der Nutzendefizite	168
Formel 6-2: Berechnung der kumulierten Länge einer Fahrzeuggruppe	172
Formel 6-3: Berechnung der kumulierten Zeit einer Fahrzeuggruppe	172
Formel 6-4: Formel zur Berechnung des Betriebskostengrundwertes.....	178
Formel 6-5: Funktionaler Zusammenhang zwischen mittlerer Fahrzeug-Geschwindigkeit und Kraftstoffverbrauch bzw. Schadstoffemission	179
Formel 6-6: Formel zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs	179
Formel 6-7: Berechnung der Betriebskosten.....	179
Formel 6-8: Formel zur Berechnung der Zeitkosten	179
Formel 6-9: Formel zur Berechnung der Schadstoffkosten in Abhängigkeit von der Schadstoffklasse ..	180
Formel 6-10: Formel zur Berechnung der Schadstoffkosten	180
Formel 6-11: Formel zur Berechnung der Unfallkosten	180
Formel 6-12: Formel zur Berechnung der Lärmkosten	181
Formel 6-13: Formel zur Berechnung des wirtschaftlichen Schadens je Zeiteinheit	181
Formel 6-14: Formel zur Berechnung des wirtschaftlichen Schadens.....	181

Formelverzeichnis

Formel 6-15: Beziehung von Fahrzeugtypen gegenüber Fahrzeuggruppen	187
Formel 6-16: Beziehung von Fahrzeuggruppen gleicher Typen unterschiedlicher Kostensätze	188
Formel 6-17: Multiplikative Verknüpfung zur Berechnung der Leistungskennwerte	188
Formel 6-18: Berechnung der Leistungskennwerte mittels Hadamard-Produkts.....	188
Formel 6-19: Bildung des Einsvektors.....	189
Formel 6-20: Verknüpfung des Einsvektors mit den Leistungskennwerten	189
Formel 6-21: Bestimmung der Leistung in Abhängigkeit von den drei Kostensätzen für einen betrachteten Datenpunkt	189
Formel 6-22: Algorithmus zur Strategienzuordnung in Abhängigkeit von den Kritikalitätsgrenzen	233
Formel 6-23: Kritikalitätsgrenzkostenfunktion.....	235
Formel 6-24: Kritikalitätsgrenzkostenfunktion in Abhängigkeit von den Grenzen	236
Formel 6-25: Kostenfunktion der optimalen Strategie einer Funktionseinheit.....	236
Formel 6-26: Funktion der Strategiewahl in Abhängigkeit von den Grenzen.....	236
Formel 6-27: Nebenbedingungen I–III.....	236
Formel 6-28: Nebenbedingungen IV–V	236
Formel 6-29: Nebenbedingung VI	236
Formel 6-30: Nebenbedingung VII	237
Formel 6-31: Kritikalitätsgrenzfunktion	237
Formel 6-32: Zieldefinition der Kritikalitätsgrenzfunktion.....	237
Formel 7-1: Mächtigkeit der Menge der Kritikalitätsmaße.....	257

Abkürzungsverzeichnis

A

A	Angebot
A	Autobahn(-nummer)
Abs.	Absatz
AG	Aktiengesellschaft
AG	Auftraggeber
AP	Arbeitspapiere
AS	Aktivsumme
Aufl.	Auflage
Ausg.	Ausgabe

B

BAB	Bundesautobahn
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BGB	Bürgerliches Gesetzbuch
BHO	Bundshaushaltsordnung
BIOS	basic input/output system
BIS	Betriebsinstandsetzung
BMI	Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
bspw.	beispielsweise
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise

C

c. p.	ceteris paribus
ca.	circa
cet. par.	ceteris paribus
CH	Kohlenwasserstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	Kohlenstoffdioxid

D

D	(Fahrzeug-) Dichte
d. b.	das bedeutet
d. h.	das heißt

DIN EN	Deutsches Institut für Normung – Europäische Norm
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
DTV _{SV}	Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke – Schwerverkehr

E

E	Einschränkung
e. V.	eingetragener Verein
ECSS	European Cooperation for Space Standardization
EG	Europäische Gemeinschaft
EIS	Ersatzinstandsetzung
ESA (esa)	Europäische Raumfahrtagentur
et al.	et alia
etc.	et cetera
EWS	Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Straßen

F

f	fugal (Einfluss)
FB	Funktionsbetrieb
FE	Funktionseinheit
ff.	fortfolgend
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
FMECA	Failure Mode and Effects and Criticality Analysis
FZ	Fahrzeug
FzG	Fahrzeuggruppe
FzT	Fahrzeugtyp

G

GEFMA	German Facility Management Association
GG	Grundgesetz
ggf.	gegebenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung

H

h	Stunde
H _A	Hierarchie der Objekte
H _{FE}	Hierarchie der Funktionseinheiten
HGrG	Gesetz über die Grundsätze des Haushaltsrechts des Bundes und der Länder
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure

Hrsg. Herausgeber
HSIA Hardware Software Interaktionsanalyse

I

i. d. R. in der Regel
i. e. S. im engeren Sinne
i. S. v. im Sinne von
i. w. S. im weiteren Sinne
IHS Instandhaltungsstrategie
ImmoWertV Immobilienwertverordnung
INES Internationale Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse
ISO Internationale Organisation für Normung
IT Informationstechnik

K

K Kritikalitätsmatrix
k Kritikalitätsvektor
Kfz Kraftfahrzeug
KG Kostengruppe
km Kilometer
km/h Kilometer pro Stunde
KW Kennwert

L

L/l Länge
LB StB-By Leistungsbeschreibung für den Straßen- und Brückenbau in Bayern
LCC Lebenszykluskosten
LE Leistungseinheit
LKW Lastkraftwagen

M

M Menge
Max Maximum
MB Megabyte(s)
Min Minimum
Mio. Million(en)
Mrd. Milliarde(n)
MTBF Mean Time between Failures
MTTR Mean Time to Restoration

N

N	Nachfrage
N	Nutzen
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NKA	Nutzen-Kosten-Analyse
NKV	Nutzen-Kosten-Verfahren
NMVOC	Flüchtige Organische Verbindungen (ohne Methan)
NO _x	Stickoxide
Nr.	Nummer

O

o. g.	oben genannt
OB	Objektbetrieb
ÖPNV	öffentlicher Personennahverkehr
Opt	Optimum

P

p	petal (Einfluss)
P/p	Preis
PC	Personal Computer
PKW	Personenkraftwagen
PM ₁₀	Partikel aus Abrieb und Aufwirbelung
PM _{2,5}	Feinstaub
PMS	Pavement-Management-System
Pos.	Position
PS	Passivsumme

Q

Q/q	Menge / Fluss / Verkehrsstärke
-----	--------------------------------

R

RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln
RAS	Richtlinien für die Anlage von Straßen
RIZ-ING	Richtzeichnungen für Ingenieurbauten
ROG	Raumordnungsgesetz
RPE	Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen
RPE-Stra01	Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen
RPS	Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme
RPZ	Risikoprioritätszahl
RQ	Regelquerschnitt

S

S.	Seite
s.	siehe
SO ₂	Schwefeldioxid
SOD	Severity – Occurrence – Detectability
sog.	sogenannte
sonst.	sonstige
STLK	Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau
StVO	Straßenverkehrsordnung

T

t	Tonne(n)
TLS	Technische Lieferbedingungen für Streckenstationen
TU	Technische Universität

U

u.	und
u. a.	unter anderem
usw.	und so weiter
u. U.	unter Umständen
u. v. m.	und vieles mehr
UEFI	Unified Extensible Firmware Interface

V

v.	von
v. a.	vor allem
V/v	Geschwindigkeit
vgl.	vergleiche
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
VwV	Verwaltungsvorschrift
VZ	Verkehrszeichen

Z

z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
ZE	Zeiteinheit
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung
Zi.	Ziffer
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

ZTV-ING Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für
Ingenieurbauten

Griechische Buchstaben und Sonderzeichen

|k| Kritikalitätsmaß
 Δ Delta
 ρ Dichte

1 Einführung

Für die volkswirtschaftlichen Akteure in industrialisierten Staaten ist die Infrastruktur eine Selbstverständlichkeit. Auf nationaler Ebene zeigen sich durch funktionale Urbanisierungs- und Suburbanisierungseffekte, der räumlichen Umverteilung der Bevölkerung in Bezug auf Agglomerationen, Gründe und Folgen der teils ungleichen Verteilung von Infrastruktur.¹ Jochimsen definiert dabei Infrastruktur wie folgt:

„Infrastruktur wird als Summe der materiellen, institutionellen und personellen Einrichtungen und Gegebenheiten definiert, die den Wirtschaftseinheiten zur Verfügung stehen und mit beitragen, den Ausgleich der Entgelte für gleiche Faktorbeiträge bei zweckmäßiger Allokation der Ressourcen [...] zu ermöglichen.“²

Im Rahmen der Globalisierung stellen die Handels- und Tourismusströme immer höhere Anforderungen an die Versorgung mit Infrastruktur.³ Auch die Anforderungen an die Informations- und Kommunikationstechnologie werden täglich höher, um die immer weiterwachsenden Datenströme abzuwickeln.⁴ Dazu kommen multinationale Unternehmen, die einen hohen Grad an Vernetzung benötigen, der ebenfalls über die Infrastruktur abgewickelt werden muss.⁵

Diese Wahrnehmung aus der jüngeren Zeitgeschichte der politischen Geographie zeigt die obligatorische Natur der Infrastruktur. Denn es ist ihre Aufgabe, die wachstums-, verbindungs- und integrationsnotwendigen Basisfunktionen in Gebieten bereitzustellen und diese solcherart zu erschließen, dass in ihnen soziale und wirtschaftliche Entwicklung möglich ist.⁶

Die Infrastrukturpolitik soll darauf aufbauend die wirtschaftlichen Akteure, welche sowohl private Haushalte als auch Unternehmen umfassen, bestmöglich mit Zugang zur Infrastruktur ausstatten. Dazu gehört vor allem ein gleichermaßen effektives wie effizientes Management. Infrastrukturmanagement ist somit ein wichtiges Instrument im Bereich der Raumordnung hinsichtlich § 2 Abs. 2 Zi. 1 *Raumordnungsgesetz (ROG)*. Dort wird insbesondere als Grundsatz der Raumordnung das Ziel definiert, „im Gesamtraum der Bundesrepublik Deutschland und in seinen Teilräumen [...] ausgeglichene soziale, infrastrukturelle, wirtschaftliche, ökologische und

¹ Vgl. Zukunftsinstitut GmbH: *Urbanisierung: Die Stadt von morgen* in: *Megatrend Urbanisierung* 2018.

² Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 100.

³ Vgl. Bundeszentrale für politische Bildung: *Tourismusverkehr*.

⁴ Vgl. Reinsel, David; Gantz, John; Rydning, John: *Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical* (April 2017), S. 4 u. 7.

⁵ Vgl. Reinsel, David; Gantz, John; Rydning, John: *Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical* (April 2017), S. 9.

⁶ Vgl. Jochimsen, Reimut; Gustafsson, Knut: *Artikel Infrastruktur* in: *Handwörterbuch der Raumforschung und Raumordnung* 2. Aufl., 2. Band (1970), Sp. 1318–1335.

kulturelle Verhältnisse anzustreben. Dabei ist die nachhaltige Daseinsvorsorge zu sichern, nachhaltiges Wirtschaftswachstum [...] zu unterstützen. Diese Aufgaben sind gleichermaßen in Ballungsräumen wie in ländlichen Räumen, in strukturschwachen wie in strukturstarken Regionen zu erfüllen. Demographischen, wirtschaftlichen, sozialen sowie anderen strukturverändernden Herausforderungen ist Rechnung zu tragen, auch im Hinblick auf den Rückgang und den Zuwachs von Bevölkerung und Arbeitsplätzen; regionale Entwicklungskonzepte und Bedarfsprognosen der Landes- und Regionalplanung sind einzubeziehen. Auf einen Ausgleich räumlicher und struktureller Ungleichgewichte zwischen den Regionen ist hinzuwirken. Die Gestaltungsmöglichkeiten der Raumnutzung sind langfristig offenzuhalten.“

Rechtlich ist diese Aufgabe demzufolge durch den Begriff der „Daseinsvorsorge“ geregelt. Diese umfasst Dienstleistungen, an deren Angebot ein besonderes öffentliches Interesse besteht.^{7 8} Forsthoff beschreibt jene als Leistungen, „auf die der einzelne durch den Verlust des selbstbeherrschten Lebensraumes und die damit einhergehende soziale Bedürftigkeit i. w. S. angewiesen ist“.⁹ Die Versorgung mit Energie, Wasser, Telekommunikation, Verkehrswesen, Abfall- und Abwasserentsorgung wird diesen ebenso zugeordnet, wie die Grundversorgung mit sozialen Dienstleistungen, z. B. mit Kulturangeboten, Gesundheitsdiensten, Kinderbetreuung, Schulausbildung und Altenpflege.¹⁰

Die Bedeutung der Infrastruktur als Gerüst einer jeden Volkswirtschaft lässt sich darüber hinaus auch im militärischen Nutzen erkennen, denn auch militärische Individuen treten als volkswirtschaftliche Akteure auf. Sie ließ sich unter anderem während des Kalten Krieges mit der Einrichtung des Infrastrukturausschusses der NATO zeigen, der mit der Errichtung von „statischen Gebäuden und festen Einrichtungen zur Unterstützung der Streitkräfte“¹¹ wie Hauptquartieren, Pipelines, Flugplätzen, Signalübertragung, Informationssystemen, Luftverteidigungssystemen, Lagerhallen, Hafenanlagen und Wartungsbasen beauftragt wurde.¹² Historisch betrachtet wird der Begriff der Infrastruktur, im spezifizierten Sinne, in militärischem Bezug bereits länger verwendet als in zivilem. So wurde diese Verwendung auf das System der öffentlichen Arbeiten eines Landes, Staates, einer Region oder einer Stadt (Wasser und Abwasser, Elektrizität, Eisenbahnen usw.) und dann in den 1970er Jahren analog dazu auf

⁷ Vgl. Knorr, Andreas: *Gemeinwohl und Daseinsvorsorge in der Infrastruktur* in: *Neuere Entwicklungen in der Infrastrukturpolitik*, Nr. 157 (2005), S. 31–53.

⁸ Vgl. Ronellenfitsch, Michael: *Daseinsvorsorge als Rechtsbegriff* in: *Kolloquium aus Anlass des 100. Geburtstags von Prof. h. c. Ernst Forsthoff* 2003 (2003), S. 53–114.

⁹ Forsthoff, Ernst: *Die Verwaltung als Leistungsträger* (Stuttgart, Berlin, 1938), S. 26.

¹⁰ Vgl. Winkel, R; Greiving, S; Pietschmann, H.: *Sicherung der Daseinsvorsorge und Zentrale-Orte-Konzepte: gesellschaftliche Ziele und räumliche Organisation in der Diskussion* (Bonn, 2007).

¹¹ NATO Infrastructure Committee: *50 Years of Infrastructure: NATO Security Investment Programme: Sharing Roles, Risks, Responsibilities, Costs And Benefits*, <https://www.nato.int/structur/intrastruc/50-years.pdf>.

¹² Vgl. P Lee, Charlotte; Schmidt, Kjeld: *A Bridge too far? Critical Remarks on the Concept of Computer-Supported Cooperative Work and Information Systems. Socio-Informatics: A Practice-based Perspective on the Design and Use of IT Artifacts*, 2018, S. 3.

soziotechnische Systeme oder ganze Industrien, die das Wirtschaftsleben eines Landes aufrechterhalten, wie Postdienste, Schiffs- und Containerverkehr, LKW, Luftfahrt, Banken usw., ausgedehnt.¹³ Diese beidseitige Bedeutung hat auch den besonderen Schutz der Infrastruktur durch die Genfer Konventionen zufolge.¹⁴

Bei dem Begriff „Infrastruktur“ handelt es sich um einen relativ jungen Begriff, der im Deutschen erst 1952 durch ebendiesen Gebrauch innerhalb des Nordatlantikkpakts bekannt wurde.¹⁵ Im Englischen dagegen ist der Begriff seit 1887 bekannt, dort aus dem Französischen übernommen, wo er seit 1875 Verwendung findet.¹⁶ Die Bedeutung ist dagegen bereits seit Längerem bekannt, so definierte Adam Smith sie zum Beispiel bereits 1776 in *Wohlstand der Nationen (The Wealth of Nations)*, wengleich er den Begriff selbst nicht kannte.¹⁷

Die Bedeutung der Infrastruktur ist in Zeiten des Friedens wie des Krieges zwar in erster Linie volkswirtschaftlicher Natur, jedoch letzten Endes als Notwendigkeit für die meisten Betriebe zur Leistungserbringung unumgänglich und somit auch für diese von Bedeutung. So können die Objekte der materiellen Infrastruktur nach Gutenberg als Produktionsfaktor, und dort als zweiter Elementarfaktor, (Betriebsmittel, die für die Produktion von Waren und Dienstleistungen notwendig sind) verstanden werden, da sie der betrieblichen Leistungserstellung dienen können.¹⁸ Errichtung, Erhalt und Betrieb sind dabei dem Objektbetrieb zuzuordnen, der die Bewirtschaftung sowie die Finanzierung des Objektes umfasst¹⁹ und der in die Sphäre des Staates fällt. Die Benutzung der Infrastruktur selbst ist dagegen dem Funktionsbetrieb zuzuordnen, welcher der Sphäre der wirtschaftlichen Akteure zuzuordnen ist. Dieser umfasst die eigentlichen Geschäftsprozesse.²⁰ Akteure sind dabei sowohl Unternehmen als auch Haushalte. Im Bereich der Infrastruktur geht der Staat in Vorleistung:²¹ Errichtete Infrastruktur wird erst nach

¹³ Vgl. P Lee, Charlotte; Schmidt, Kjeld: *A Bridge too far? Critical Remarks on the Concept of Computer-Supported Cooperative Work and Information Systems. Socio-Informatics: A Practice-based Perspective on the Design and Use of IT Artifacts*, 2018, S. 3.

¹⁴ Vgl. Genfer Konventionen: *Zusatzprotokoll I - über den Schutz der Opfer internationaler bewaffneter Konflikte* (1977), Art. 52, 54, 56.

¹⁵ Vgl. van Laak, Dirk: *Alles im Fluss: Die Lebensadern unserer Gesellschaft: Geschichte und Zukunft der Infrastruktur* (Frankfurt am Main: S. Fischer, 2018), S. 15.

¹⁶ Vgl. Harper, Douglas: *Online Etymology Dictionary*, zuletzt geprüft am 23.11.2018, "infrastructure".

¹⁷ Vgl. Smith, Adam: *Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen*, 8. Aufl., Dtv 2208 (München: Dt. Taschenbuch-Verl., 1999), S. 612.

¹⁸ Vgl. Gutenberg, Erich: *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*, 24., unveränderte Auflage, Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1971). doi:10.1007/978-3-642-61989-2, S. 3 f.

¹⁹ Vgl. Zimmermann, Josef: *Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre* in: *Bauingenieur* 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

²⁰ Vgl. Zimmermann, Josef: *Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre* in: *Bauingenieur* 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

²¹ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 108.

der Inanspruchnahme durch Steuern und Gebühren refinanziert. Dementsprechend stehen einem gegenwärtigen Aufwand zukünftige Erträge gegenüber.²²

1.1 Forschungsgegenstand

Zur Infrastruktur gehören nach Jochimsen auch die institutionellen und personalen Bereiche,²³ die in sich betrachtet immateriell erscheinen. Diese Bereiche lassen sich mit der Methodik dieser Arbeit nicht erfassen und werden daher nicht weiter behandelt.

Die materielle Infrastruktur, d.h. solche, die sich in Bauwerken widerspiegelt, lässt sich mit der hier vorgestellten Methodik dagegen untersuchen, da nur physische Objekte mit ihr betrachtet werden können. Dabei soll die Bewertungsmethodik im Bereich der technischen Infrastruktur hergeleitet werden. Diese entspricht jenen Sparten, welche die Grundversorgung der Menschen, flächendeckend durch ihren Charakter als Netzinfrastruktur, sichern. Dazu gehören Energie, Verkehr, Telekommunikation und stoffliche Ver- und Entsorgung.

Dabei wird das Vorgehen dieser Arbeit so erarbeitet, dass es für die materielle Infrastruktur im Allgemeinen anwendbar ist. Hergeleitet wird es in der Sparte der Verkehrsinfrastruktur, hier im Speziellen aus dem Bereich der Bundesfernstraßen, primär der Autobahnen, da die zugrundeliegenden Daten hier in entsprechender Form öffentlich vorliegen. Für andere Infrastruktursparten soll sich die Methodik analog anwenden lassen, wenngleich die notwendigen Informationen benötigt werden.

Eine Anwendung im Bereich der sozialen Infrastruktur ist dann ebenfalls möglich, wenngleich sie nicht Bestandteil der Arbeit ist. Hierbei handelt es sich vor allem um jene Sparten, die nicht als Netz-, sondern als Punktinfrastrukturen ausgebildet werden, wie Einrichtungen zur Erziehung, Bildung, Forschung, Verwaltung, Gesundheit und Kultur.

Die genaue Definition der Infrastruktur sowie ihrer Bereiche findet sich in Kapitel 2.1.

Das Alter der Verkehrsinfrastruktur in Deutschland lässt sich durch die Zerstörung im Zweiten Weltkrieg vergleichsweise gut einschränken, so sind nur wenige Streckenabschnitte aus der Vorkriegszeit heute noch vorhanden. Allein während des Krieges wurden 45 % der Reichsautobahnen so stark zerstört, dass sie aufgegeben wurden.²⁴ Darüber hinaus ist ein

²² Vgl. Jochimsen, Reimut; Heilemann, Ullrich; Simonis, Udo Ernst: *Ökonomie für die Politik – Politik für die Ökonomie: Ausgewählte Schriften*. Hrsg. von Ullrich Heilemann, Volkswirtschaftliche Schriften v. 534 (Berlin: Duncker & Humblot, 2015), S. 41.

²³ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 117 u. S. 123.

²⁴ Vgl. Reitsam, Charlotte: *Reichsautobahn im Spannungsfeld von Natur und Technik: Internationale und interdisziplinäre Verflechtungen* (Habilitationsschrift, Fakultät für Architektur, Technische Universität München, 26.07.2004), S. 221.

Großteil des Autobahnnetzes erst nach dem Krieg entstanden.²⁵ Die unterirdische Infrastruktur der Wasserver- und -entsorgung kann dagegen, aufgrund geringerer erlittener Schäden während des Krieges, deutlich älter sein. Insgesamt beläuft sich der Wiederbeschaffungsneuwert der deutschen Straßenverkehrsinfrastruktur inklusive Brücken und Tunnel sowie der öffentlichen Wasserver- und Abwasserentsorgung auf ca. 2 Billionen €. ²⁶ In einer Untersuchung konnte dabei der Instandsetzungsrückstau auf ca. 285 Mrd. € beziffert werden.²⁷ Dieser Rückstau (vgl. auch Kapitel 4) entspricht der bedingungslos besten Instandhaltungsstrategie vor dem Hintergrund der Verfügbarkeit gegenüber den tatsächlichen Aufwendungen unter Berücksichtigung des Zustands der untersuchten Objekte. Diese Differenz ist zu hoch, als dass die Beseitigung von der Volkswirtschaft innerhalb eines Allokationsproblems vertreten werden kann. Daher ist eine Priorisierung notwendig, wenn es darum geht, wirtschaftlich, d. h. in ausgewogenem Kosten-Nutzen-Verhältnis, instand zu halten und die Verfügbarkeit zu gewährleisten.

Die Bundesfernstraßen besitzen einen Wiederbeschaffungsneuwert in Höhe von 102,04 Mrd. € (exklusive Tunnel und Brücken), entsprechend dem Preisstand 2016. Im Jahr 2017 beträgt der Rückstau der Instandhaltung im Bereich der Verkehrsinfrastruktur 11,93 %. Dabei entfallen auf die Bundesfernstraßen, die Hauptwirtschaftsträger, 11 Mrd. € (das entspricht 10,79 %), 5,32 Mrd. € auf Bundesautobahnen, 5,69 Mrd. € auf Bundesstraßen.²⁸ Andere Untersuchungen zeigen Werte in ähnlicher Größenordnung, wenngleich oft unterschiedliche Untersuchungsgegenstände abgesteckt wurden, bspw. hinsichtlich der Ingenieurbauwerke. Auch die Bewertungsgrundsätze sind unterschiedlich, so werden unter anderem die Kenngrößen Wiederbeschaffungsneuwert, Wiederbeschaffungswert, Bruttoanlagevermögen, Nettoanlagevermögen oder auch Substanzwert verwendet, was Vergleiche unmöglich macht. Das Deutsche Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) errechnete für Autobahnen und Bundesstraßen zusammen 213 Mrd. € (Bruttoanlagevermögen, 2007) bzw. 167 Mrd. € (Nettoanlagevermögen, 2007).²⁹ Deutsche Bank Research beziffert den Substanzwert der Bundesautobahnen im Jahr 2006 auf 105 Mrd. €. ³⁰ Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur prognostizierten Alfen Consult GmbH, AVISO GmbH und BUNG

²⁵ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2012: Unterrichtung durch die Bundesregierung* (Berlin, 2014), Drucksache Nr. 18/580, S. 142.

²⁶ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase – Teil 1* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

²⁷ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase – Teil 1* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

²⁸ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

²⁹ Vgl. Link, Heike; Kalinowska, Dominika et al.: *Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland 2007: Endbericht*, Forschungsprojekt im Auftrag des BGL, ADAC und BDI (2018).

³⁰ Vgl. Heymann, Eric; Alfen, Hans Wilhelm; Tegner, Henning: *Privatisierungsoptionen für das deutsche Autobahnnetz* (Frankfurt am Main, 2006), S. 12.

Ingenieure AG 2018 für die Bundesfernstraßen 189 Mrd. € (Bruttoanlagevermögen) bzw. 118 Mrd. € (Nettoanlagevermögen).³¹

1.2 Problemstellung

Während die qualitative Bedeutung der Infrastruktur nur wenig Widerspruch erfährt, ist eine Quantifizierung der Bedeutung wesentlich schwieriger, da der Nutzen subjektiv ist und davon abhängt, ob Produkt oder Dienstleistung zum Erhalt der individuellen Wertvorstellung beiträgt.³² Damit gehen auch Probleme in der Zuweisung von Mitteln aus dem Haushalt einher, die zum Bau, Unterhalt und Betrieb notwendig sind. Die Infrastruktur gilt allgemein hin als unterfinanziert.^{33 34} Untersuchungen zum Instandsetzungsrückstau bestätigen diese Vermutung.^{35 36} Dabei stellt sich die Frage, ob diese Unterfinanzierung behoben werden kann, indem mehr Mittel zur Verfügung gestellt werden. Logisch betrachtet würden sie bereits zur Verfügung gestellt werden, wenn sie vorhanden wären. Es ist demzufolge, gemäß der Definition der Ökonomik, von einer Knappheit an finanziellen Mitteln zur Investition³⁷ in die Infrastruktur auszugehen.

Dazu ist zu berücksichtigen, dass die Mittel, die in den Erhalt der Infrastruktur fließen, in der Regel durch Steuern, Gebühren und Beiträge finanziert werden.³⁸ Um einen Instandsetzungsrückstau zu beseitigen, bedarf es zum einen der Auflösung des Rückstaus selbst und zum anderen der Vermeidung desselben in der Zukunft. Die Vermeidung durch eine vollumfängliche aktive, vorausbestimmte Instandhaltung benötigt, den Prinzipien der Ökonomik folgend, zusätzliche Mittel, die nur durch eine Erhöhung des finanziellen Inputs, d. h. der Steuern bzw. Gebühren und Beiträge, erreicht werden kann (vgl. Kapitel 4). Dieser Erhöhung steht dann eine deutlich funktionssicherere Infrastruktur gegenüber, die jedoch Restpotentiale ungenutzt lässt, da nicht

³¹ Vgl. Alfen Consult GmbH, AVISO GmbH, BUNG Ingenieure AG: *Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022* (Weimar, Leipzig, Aachen, Münster, Köln, 2018), S. 17 f.

³² Vgl. Lai, Albert Wenben: *Consumer Values, Product Benefits and Costumor Value*, *Advance in Consumer Research* 22 (1995), S. 384.

³³ Vgl. Kopper, Christopher; Hartwig, Karl-Hans et al.: *Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland: Marode und unterfinanziert* 93 (2013). doi:10.1007/s10273-013-1582-5.

³⁴ Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.: *Verkehrsinfrastruktur – Was ist zu tun?*, <https://bdi.eu/artikel/news/verkehrsinfrastruktur-was-ist-zu-tun/>.

³⁵ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase – Teil 1* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

³⁶ Vgl. Sturm, P; Gluth, G.J.G. et al.: *Sulfuric acid resistance of one-part alkali-activated mortars* in: *Cement and Concrete Research* 2018, Nr. 109 (2018).

³⁷ Vgl. Universität Marburg: *Womit beschäftigt sich die Wirtschaftswissenschaft?* (Universität Marburg, 2007), https://web.archive.org/web/20110222044456/http://www.uni-marburg.de/fb02/studium/studgang/studinteressierte/studium_allg/wiwi.

³⁸ Vgl. Bundeszentrale für politische Bildung: *Grundsätze der Steuerpolitik: Was sind eigentlich Steuern?* in: *Informationen zur politischen Bildung*, Nr. 288 (2012), S. 5.

aufgezehrte Abnutzungsvorräte verloren gehen und nicht entgeltlich abgelöst werden können. Im Zuge eines klassischen Allokationsproblems ist das jedoch nicht zu rechtfertigen und diese zusätzliche Belastung für die Bürger der Volkswirtschaft wäre wirtschaftswissenschaftlich nicht begründbar.

Hier setzt die Ökonomik bzw. die Wirtschaftswissenschaft an, die im Allgemeinen davon ausgeht, dass Güter, zu denen auch finanzielle Mittel gehören, nur beschränkt verfügbar sind. Die Wirtschaftswissenschaft teilt sich in die Volkswirtschaft(-lehre) und die Betriebswirtschaft(-lehre). Beide Teildisziplinen (und damit auch die übergeordnete) untersuchen und lehren den rationalen Umgang mit diesen knappen Ressourcen.³⁹

Entsprechend der Problemstellung der begrenzten finanziellen Mittel muss das Ziel darin bestehen, diese begrenzten Ressourcen optimal zu verwenden und somit aus einem gegebenen finanziellen Input einen maximalen (volkswirtschaftlichen) Output zu generieren. Es handelt sich demnach um ein ökonomisches Problem, welches gemäß dem ökonomischen Prinzip gelöst werden muss.

Die gerechte und bedarfsorientierte Mittelzuweisung des Bundes zum Erhalt der deutschen Infrastruktur ist eine komplexe Aufgabe. So müssen, gemäß der Daseinsvorsorge neben dem aktuellen Zustand der einzelnen Objekte auch die zukünftigen Anforderungen Berücksichtigung finden.⁴⁰ Regionale Disparitäten und deren Änderungen in der Zukunft können nur bedingt antizipiert werden und sind mit der Zukunftsforschung Gegenstand einer ganzen Wissenschaft.⁴¹

Einen möglichen Ansatz zur bedarfsgerechten Mittelzuweisung stellt der Bundesverkehrswegeplan (ähnlich auch Landesverkehrspläne) dar. Dabei wird die Notwendigkeit auf Basis von Nutzen-Kosten-Analysen ermittelt. Diese werden jedoch nicht bindend politisch umgesetzt. Zudem handelt es sich beim Bundesverkehrswegeplan um keinen fertigen Investitionsplan.⁴² Stattdessen wird er als „Rahmenprogramm und wichtiges Planungsinstrument“ bezeichnet.⁴³ Im Bereich des Erhalts der Infrastruktur wird, bezogen auf die nationale Struktur, von einer allgemeinen Systematik ausgegangen. Das bedeutet, dass jedes Objekt gleichgestellt und gleichbehandelt wird. Das BMVI verwendet für den BVWP ein Bewertungsverfahren mit dem Ziel, für jedes Projekt ein Nutzen-Kosten-Verhältnis zu erstellen und diese somit untereinander vergleichbar zu machen. Diese Absicht ist aus

³⁹ Vgl. Universität Marburg: *Womit beschäftigt sich die Wirtschaftswissenschaft?* (Universität Marburg, 2007), https://web.archive.org/web/20110222044456/http://www.uni-marburg.de/fb02/studium/studgang/studinteressierte/studium_allg/wiwi.

⁴⁰ Vgl. *Raumordnungsgesetz, ROG*, Deutscher Bundestag (2008), § 2 Abs. 2 Zi. 1.

⁴¹ Vgl. Kreibich, Rolf: *Zukunftsforschung: ArbeitsBericht Nr. 23/2006* (2006), S. 3.

⁴² Vgl. Bardt, Hubertus; Chrischilles, Esther et al.: *Die Infrastruktur in Deutschland: Zwischen Standortvorteil und Investitionsbedarf*, IW-Analysen 95 (Köln: Inst. der Dt. Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2014), S. 31.

⁴³ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bekanntmachung zur Annahme des Bundesverkehrswegeplans 2030 Bundesanzeiger*, 01.08.2016, zuletzt geprüft am 22.11.2018.

wirtschaftswissenschaftlicher Sicht korrekt. Das Vorgehen wurde jedoch vom Bundesrechnungshof in mehrfacher Hinsicht gerügt, so sich das „BMVI nicht auf fachliche Argumente stützte“ und Festlegungen „willkürlich erschein[en]“.⁴⁴ Allgemein schreibt der Bundesrechnungshof: „Das Ziel des BMVI, die Kostenermittlungen der von den Ländern gemeldeten Straßenbauprojekte zu plausibilisieren, um deren Verlässlichkeit zu verbessern, wurde insgesamt nicht erreicht. Damit sind auch die NKV der Projekte weder verlässlicher noch besser untereinander vergleichbar.“⁴⁵

Ein weiterer Punkt, der den wirtschaftswissenschaftlichen Standpunkt untermauert, ist die Tatsache, dass für die Finanzierung der Infrastruktur im Wesentlichen Steuergelder verwendet werden. Es ist demzufolge im Interesse jedes Steuern zahlenden Individuums, dass die von ihm und allen anderen entrichteten Beträge effektiv und effizient verwendet werden. Verluste, die abseits des Optimums entstehen, werden schließlich von ihm getragen.

Die wirtschaftliche Verwendung (wirtschaftlich ist hier im Sinne von Effizienz zu verstehen) ist daher auch rechtlich geregelt. Hierarchisch wird diese wirtschaftliche Verwendung durch das *Grundgesetz (GG)* sowie das *Gesetz über die Grundsätze des Haushaltsrechts des Bundes und der Länder (Haushaltsgrundsätzegesetz – HGrG)* und die *Bundeshaushaltsordnung (BHO)* geregelt. So überprüft der Bundesrechnungshof mit Kraft seiner richterlichen Unabhängigkeit die Rechnung, Wirtschaftlichkeit und Ordnungsmäßigkeit der Führung des Haushalts und der Wirtschaft des Bundes (Art. 114 Abs. 2 Satz 1 GG). Darüber hinaus wird von den Haushaltsplänen Wirtschaftlichkeit und Sparsamkeit in Aufstellung und Ausführung (§ 6 Abs. 1 HGrG) sowie die Durchführung angemessener Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für alle finanzwirksamen Maßnahmen (§ 6 Abs. 2 HGrG) gefordert.

Dazu reicht die Nutzen-Kosten-Analyse jedoch nicht aus. Im Zuge einer Optimierung muss die Bedeutung des Objektes und der Teile berücksichtigt werden. Erst dann kann, nach den Prinzipien der Wirtschaftswissenschaften, eine rationale Entscheidung über den Effekt einer Investition gefällt werden. So lassen sich zwei gleichartige Objekte mit unterschiedlicher wirtschaftlicher Bedeutung vor dem Hintergrund ebendieser Bedeutung ordnen. Notwendig ist demzufolge eine Hierarchie, die diese Ordnung abbildet. Bereits 1966 forderte Jochimsen in seiner „Theorie der Infrastruktur“:

⁴⁴ Ahrendt; Rahm; Moebus: *Bericht über die Plausibilisierung der Investitionskosten von Straßenbauprojekten zur Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2030: Bericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach § 88 Abs. 2 BHO* (Bundesrechnungshof), S. 12.

⁴⁵ Ahrendt; Rahm; Moebus: *Bericht über die Plausibilisierung der Investitionskosten von Straßenbauprojekten zur Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2030: Bericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach § 88 Abs. 2 BHO* (Bundesrechnungshof), S. 3.

„Die Rolle der öffentlichen Gemeinwesen [...] zu bestimmen, ist unerlässlich. Dies stellt die Frage nach dem sozialökonomisch⁴⁶ wie auch einzelwirtschaftlich zweckmäßigen Wirtschaftlichkeitskriterium für die zeitliche und sachliche Rangfolge der Investitionen, die im Bereich der materiellen Infrastruktur und der direkt produktiven Tätigkeiten vorgenommen werden sollen.“⁴⁷

Die vorliegende Arbeit betrachtet im Wesentlichen zwei Bereiche. Zum einen die volkswirtschaftliche Bedeutung einer untersuchten Einheit, zum anderen die individuelle Anfälligkeit ihrer Bestandteile gegenüber einem Ausfallereignis mitsamt den daraus resultierenden Folgen. Damit soll ein Anreiz geschaffen werden, Maßnahmen solcherart auszuführen, dass die volkswirtschaftlichen Schäden durch Einschränkungen an der Verfügbarkeit minimiert werden. Durch eine hierarchische Gliederung der untersuchten Einheiten wie auch ihrer Bestandteile können Mittel solcherart verteilt werden, dass Projekte in Abhängigkeit von ihrer gesamtwirtschaftlichen Bedeutsamkeit priorisiert werden.

Volkswirtschaftlich wird die Instandhaltung als Aufgabe des Staates als (externe⁴⁸) Institution verstanden. Dementsprechend steht in der Betrachtung der volkswirtschaftliche Aspekt im Vordergrund. Stehen dagegen betriebswirtschaftliche Aspekte im Fokus, kann der Staat als (öffentliches⁴⁹) Unternehmen angesehen werden.

Die Abbildung 1-1 zeigt die Darstellung der Instandhaltung. Sie kann als betriebswirtschaftliche Aufgabe verstanden werden, bei der der Staat als Unternehmen auftritt. Die Infrastruktur entspricht dann dem Produkt des Unternehmens.^{50 51} In diesem Fall soll das Unternehmen nach den Regeln der Betriebswirtschaftslehre agieren und vor dem Hintergrund der gegebenen Eigenschaften der Infrastruktur die Mittel möglichst gewinnbringend verwenden. Dazu gehören Untersuchungen hinsichtlich der eigentlichen Kosten von Teilen und Maßnahmen, deren Lebensdauerstruktur und der Auswirkungen der Instandhaltung, um ein wirtschaftliches Optimum

⁴⁶ Sozialökonomie und Sozioökonomie bzw. sozialökonomisch und sozioökonomisch sind hier synonym zu verstehen.

⁴⁷ Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 108.

⁴⁸ Vgl. Kiwit, Daniel; Voigt, Stefan: *Überlegungen Zum Institutionellen Wandel Unter Berücksichtigung Des Verhältnisses Interner Und Externer Institutionen* in: *ORDO: Jahrbuch Für Die Ordnung Von Wirtschaft Und Gesellschaft* 1995, Nr. 46.

⁴⁹ Richtlinie der Kommission (der europäischen Gemeinschaften) vom 25. Juni 1980 über die Transparenz der finanziellen Beziehungen zwischen den Mitgliedstaaten und den öffentlichen Unternehmen (80/723/EWG): Als öffentliches Unternehmen gilt „jedes Unternehmen, auf das die öffentliche Hand aufgrund Eigentums, finanzieller Beteiligung, Satzung oder sonstiger Bestimmungen, die die Tätigkeit des Unternehmens regeln, unmittelbar oder mittelbar einen beherrschenden Einfluß ausüben kann.“

⁵⁰ Vgl. Marshall, Tim; Erlhoff, Michael, Hrsg.: *Design dictionary: Perspectives on design terminology*, Board of International Research in Design (Basel, Boston: Birkhäuser Verlag, 2008).

⁵¹ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 280.

hinsichtlich der Kosten zu erzeugen. Die Eigenschaften werden dabei als immanenter Charakter gegeben und Werturteile vermieden.⁵²

Im Gegensatz dazu kann (und soll hier) die Instandhaltung als volkswirtschaftliche Aufgabe verstanden werden. Der Staat tritt dabei als Institution auf. Die Infrastruktur entspricht dann dem Gut der Institution.^{53 54} Dem Wesen der Infrastruktur nach wird hier der Sachverhalt aufgegriffen, dass das zu Verfügung stellende Organ keinen direkten monetären Nutzen aus dem Gut ziehen kann. Gemäß Jochimsen stellt er die Infrastruktur für die Wertschöpfung zur Verfügung, die dann von Dritten erbracht wird. Dabei wird die Infrastruktur hinsichtlich ihres Nutzens an sich sowie der Nutzen innerhalb der Objekte bewertet. Mittel sollen solcherart verteilt werden, dass der erreichte Nutzen maximal ist. Dabei werden Werturteile berücksichtigt, eine hierarchische Ordnung erstellt und die finanziellen Mittel erst zum Schluss verteilt.



Abbildung 1-1: Abgrenzung des Themengebietes

Durch Vereinigung beider Ansichten kann der Staat als Dienstleister effizient auftreten und seine Dienstleistung, die Infrastruktur, gesamtwirtschaftlich zur Verfügung stellen. „Dienstleistung“ bedeutet dabei, entsprechend dem Wort „dienen“, eine Tätigkeit, die der Dienstleister einem

⁵² Vgl. Wong, Stanley: *positive economics The New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 1987, S. 920 f.

⁵³ Vgl. Becker, Fred G. (Hrsg): *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre: Mit 34 Tabellen*, BWL im Bachelor-Studiengang (Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006), S. 2.

⁵⁴ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 280.

anderen (hier der Summe der Individuen der Volkswirtschaft) gegenüber erbringt, innerhalb seines institutionell verbindlichen Handlungsrahmens.⁵⁵ Erstellung und Erhalt werden dann solcherart gemanagt, dass Kosten minimiert (betriebswirtschaftliche Aufgabe) und Nutzen maximiert (volkswirtschaftliche Aufgabe) werden. Der Unterhalt der Infrastruktur, der während der Betriebsphase stattfindet, beeinflusst die Substanz dabei während der gesamten Lebensdauer und kann den gesamtwirtschaftlichen Ansatz um ein wesentliches Element zur Effizienzoptimierung erweitern, wodurch ein ganzheitliches Infrastrukturmanagement entsteht.

1.3 Zielsetzung und Methodik

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung von Entscheidungskriterien zur optimalen Mittelzuweisung zum Erhalt einer funktionsfähigen Infrastruktur. Dabei werden sowohl die Bauwerke als auch ihre volkswirtschaftliche Bedeutung untersucht und zueinander in eine Beziehung gesetzt, um die gesamtwirtschaftliche Bedeutung vergleichbar zu machen und somit eine Mittelzuweisung ableiten zu können.

Die Abbildung 1-2 zeigt die Absicht qualitativ. Allgemein lassen sich auf Abszisse und Ordinate zwei grundlegende, aber voneinander verschiedene Aspekte ordinal beschreiben. Elemente innerhalb der Matrix lassen sich dann als Wertepaar in Abhängigkeit von beiden Aspekten beschreiben. Ferner lassen sich innerhalb der Matrix unterschiedliche Bereiche beschreiben, was die Wertung der Wertepaare angeht.

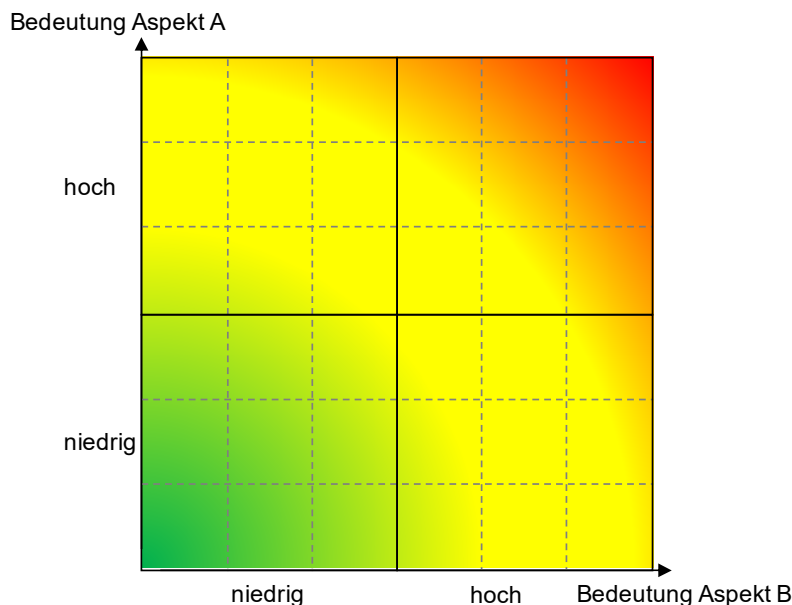


Abbildung 1-2: Zweidimensionale Betrachtung von Aspekten mit einer qualitativen Wertung

⁵⁵ Vgl. Bauer, Rudolph: *Personenbezogene Soziale Dienstleistungen: Begriff, Qualität und Zukunft* (Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2001). doi:10.1007/978-3-322-91616-7, S. 50.

Vor diesem Hintergrund soll das Forschungsziel ein Verfahren sein, eine Dritte (die Instandhaltung) auf Basis einer Bewertung zweier Aspekte, den sozioökonomischen auf der einen Seite und den einzelwirtschaftlichen auf der anderen Seite, zu bewerten und zu rechtfertigen, sodass eine Mittelzuweisung auf Basis fundamentaler Wertungen getätigt werden kann.

Es ist das letztendliche Ziel, Infrastrukturobjekte mehrdimensional hinsichtlich ihrer Bedeutung gliedern zu können. Eine mögliche Anwendung wäre die Mittelzuweisung nach volkswirtschaftlicher Bedeutung innerhalb einer Infrastruktursparte und darauf aufbauend eine Verteilung der zugewiesenen Mittel innerhalb der einzelnen Objekte zur Minimierung der Nutzungseinschränkung durch die Maßnahmen des Erhalts.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wird dann eine Handlungsempfehlung formuliert, die sowohl die übergeordnete Mittelzuweisung als auch die untergeordnete Verwendung innerhalb der Maßnahmen des Erhalts der Infrastruktur steuern bzw. koordinieren kann. Dabei handelt es sich um eine ordinale Beziehung der Objekte, das Ergebnis wird dementsprechend eine Hierarchie der untersuchten Objekte sein. Diese Hierarchie soll aus einer Überlagerung der beiden Ordnungen hinsichtlich der einzelwirtschaftlichen Bedeutung sowie der sozioökonomischen Bedeutung abgeleitet werden.

Diese Handlungsempfehlung soll zudem die Änderung finanzieller Mittel berücksichtigen. Durch Budgetvorgaben „von oben“ wird so im Allgemeinen keine Vorgabe hinsichtlich der Verwendung der Mittel gemacht. Im Zuge einer Optimierung mit dem Ziel, die vorhandenen Mittel möglichst vollständig auszureizen, kann es theoretisch zu dem Fall kommen, dass Instandhaltung in mehreren Bereichen (im Sinne der Verfügbarkeit) besser ausgeführt wird und in wenigen Bereichen im Ausgleich schlechter. Dies liegt darin begründet, dass der Verzehr der Mittel keine stetige Funktion darstellt. Gewichtet man die finanziellen Mittel mit volkswirtschaftlichen Kenngrößen, kann das Ergebnis schlechter sein als bei geringeren zur Verfügung stehenden Mitteln. Hier sollte bspw. mithilfe einer Sensitivitätsanalyse der Verlauf des Nutzens infolge der zusätzlichen Mittel bewertet werden.

Als Vergleich und Beispiel kann die Triage dienen. Sie wurde 1792 von dem französischen Chirurg Freiherr Dominique Jean Larrey für die napoleonischen Kriege entwickelt.⁵⁶ Bei einer Triage handelt es sich um ein Verfahren zur Priorisierung medizinischer Hilfeleistung, wenn eine Bewältigung der Gefahrenlage mit den vorhandenen Mitteln nicht möglich ist.⁵⁷ Dieser Sachverhalt tritt insbesondere bei unerwartet hohem Aufkommen an Patienten auf. Daher ist die Triage ein effektives Verfahren für den Katastrophenfall und damit den Bevölkerungsschutz. Sie

⁵⁶ Vgl. Blöß, Timo: *Zwang zur Selektion* in: *Deutsches Ärzteblatt* 101, Nr. 33 (2004); *Katastrophenmedizin*, S. A2216.

⁵⁷ Vgl. Kern, B.-R.: *Rechtsgrundlagen für die Einsätze im Katastrophenfall und die Triage Katastrophenmedizin*, 2013, S. 43.

folgt der „Maximierungsformel“, wenn nicht alle Hilfsbedürftigen gerettet werden können, soll versucht werden, die größtmögliche Zahl an Menschenleben zu retten.⁵⁸

Darüber hinaus lassen sich mehrere Parallelen zwischen der Triage und dem Ziel dieser Arbeit hinsichtlich des Instandhaltungsmanagements ziehen. So handelt es sich in beiden Fällen um ein klassisches Allokationsproblem gemäß den Wirtschaftswissenschaften, bei dem die Ressourcen, medizinische Hilfe einerseits und finanzielle Mittel andererseits, begrenzt sind. Die Dringlichkeit als Entscheidungsparameter wird farblich und durch Zahlen (z. B. 1–4) kenntlich gemacht.⁵⁹

Zur Beurteilung der Patienten sind bei der Triage verschiedene Parameter gegeben, so unter anderem Atmungsfrequenz, Sättigung des peripheren Sauerstoffs (Pulsoxymetrie), Herzschlagfrequenz, Glasgow-Koma-Skala und Temperatur.⁶⁰ Für die Dringlichkeit innerhalb der Instandhaltung sollen analoge Parameter gefunden werden, die eine Einteilung beeinflussen, so etwa Verkehrsbelastung, Verkehrszusammensetzung, Querschnitt, Betriebskosten und Zeitkosten. In beiden Verfahren wird demzufolge die Dringlichkeit auf Basis von Parametern begründet.

Zudem hat in beiden Fällen der Funktionsbetrieb oberste Priorität. Einschnitte im Funktionsbetrieb sind eine direkte Folge der begrenzten Ressourcen. Besteht der Funktionsbetrieb innerhalb der Triage in der Lebensfunktion des Patienten, so besteht er in der Infrastrukturbetrachtung bspw. in der Abwicklung des Verkehrs. Beide Funktionsbetriebe sind zudem praktisch unbezahlbar. So ist ein Menschenleben moralisch nicht mit Geld aufzuwerten. Versuche, etwa über Versicherungswerte oder Organwerte führen mitunter zu Millionenbeträgen für ein einzelnes Menschenleben. Infrastruktur hat Wiederbeschaffungswerte und Instandhaltungskosten in mehrstelliger Milliardenhöhe. Um den Funktionsbetrieb zu gewährleisten, sind in beiden Fällen Maßnahmen unumgebar, die dem Lösen eines klassischen Allokationsproblems entsprechen.

Das Forschungsziel ist die Genese eines Modells, welches in der Lage ist, die Problemstellung zu lösen. Ein Modell soll dabei als vereinfachende Relation eines Ausschnitts der Realität verstanden werden und im Kontext der Arbeit ein Konzept beschreiben, welches den Erhalt eines definierten Soll-Zustandes bzw. die Rückführung von einem Ist-Zustand in diesen beschreibt. Auch die Dokumentation der Herleitung dieses Konzepts ist Inhalt der Arbeit.

⁵⁸ Vgl. Brech, Alexander: *Triage und Recht: Patientenauswahl beim Massenanfall Hilfebedürftiger in der Katastrophenmedizin. Ein Beitrag zur Gerechtigkeitsdebatte im Gesundheitswesen*, 1. Aufl., Schriften zum Gesundheitsrecht 11 (Berlin: Duncker & Humblot, 2008), Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2007, S. 280.

⁵⁹ Vgl. Barfod, Charlotte; Lauritzen, Marlene Mauson Pankoke et al.: *Abnormal vital signs are strong predictors for intensive care unit admission and in-hospital mortality in adults triaged in the emergency department – a prospective cohort study* 20 (2012). doi:10.1186/1757-7241-20-28.

⁶⁰ Vgl. Barfod, Charlotte; Lauritzen, Marlene Mauson Pankoke et al.: *Abnormal vital signs are strong predictors for intensive care unit admission and in-hospital mortality in adults triaged in the emergency department – a prospective cohort study* 20 (2012). doi:10.1186/1757-7241-20-28.

In der Soziologie wird der Modellbegriff unter anderem als formalisierte Theorie aufgefasst.⁶¹ Diese Auffassung impliziert einen theoretischen Gehalt. Aber auch ohne erklärenden Gehalt handelt es sich bei einem Modell um eine Theorie deskriptiver Natur.⁶² Demzufolge kann ein Modell als Darstellung einer Theorie verwendet werden.

In der Logik wird die Theorie als nichts anderes als eine deduktiv abgeschlossene Menge aufgefasst.⁶³ Somit kann auch die Maxime eines Modells als formalisierte Theorie verstanden werden. Denn das Modell entspricht in diesem Sinne einer Struktur, welche die Sätze der zugrundeliegenden Theorie als Bausteine enthält. Dabei soll die Summe der Sätze der Theorie in dieser Abstraktionsform durch die Parameter und Annahmen des Modells ausgedrückt werden.

Dies lässt sich erreichen, indem eine bewertende Methodik auf reale Sachverhalte angewandt wird. Diese Sachverhalte, die den geforderten Ausschnitt der Realität darstellen, werden durch Informationen (Werte, Kennzahlen, Benchmarks, etc.) ausgedrückt. Sie stellen den Status quo dar, der bewertet werden soll.

Der Aspekt der Formalisierung geht mit verschiedenen Eigenschaften einher, die für die formalisierte Theorie charakteristisch sind. Dazu gehören unter anderem und vor allem ihre Allgemeinheit (als Neutralisierung unwesentlicher Züge), ihre erhöhte Objektivität und ihre Abgeschlossenheit der (minimalisierten) Annahmen.⁶⁴

Das Modell selbst wird, wie per definitionem von der Theorie gefordert, mittels Deduktion erzeugt. Dabei soll der Aristoteles'schen Auslegung gefolgt werden, dass es unter bestimmten Voraussetzungen (Annahmen) „etwas von dem Vorausgesetzten Verschiedenes mit Notwendigkeit dadurch ergibt, dass dieses der Fall ist.“⁶⁵ Dabei ist das Modell jene Konklusion, die sich als dieses „Verschiedenes“ manifestiert.

Die Logik ist ein immanentes Element der Deduktion. Für die Logik, die der Deduktion in dieser Arbeit zugrunde liegt, gelten die „semantischen Prinzipien“ (das Prinzip der Zweiwertigkeit, das Prinzip der logischen Unabhängigkeit sowie das Prinzip der Extensionalität).⁶⁶

⁶¹ Nach Mayntz, Renate: *Modellkonstruktion: Ansatz Typen und Zweck*, Formalisierte Modelle in der Soziologie (Neuwied/Berlin: Luchterhand, 1967).

⁶² Vgl. Mayntz, Renate: *Modellkonstruktion: Ansatz Typen und Zweck*, Formalisierte Modelle in der Soziologie (Neuwied/Berlin: Luchterhand, 1967), S. 15.

⁶³ Vgl. Zelewski, Stephan: *Strukturalistische Produktionstheorie* (Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1993). doi:10.1007/978-3-322-96173-0, S. 6.

⁶⁴ Vgl. Suppes, Patrick: *Warum Formalisierung in der Wissenschaft erwünscht ist*, Zur Logik empirischer Theorien (Berlin u.a.: de Gruyter, 1983), S. 27 ff.

⁶⁵ Aristoteles: *Analytica priora*, I 1, 24b18–20; ähnlich *Topik*, I 1, 100a25–27; oder *Sophistische Widerlegungen*, 1, 165a1 f., z. B. in Zekl, Hans Günter; Aristoteles: *Organon*, Philosophische Bibliothek 492 (Hamburg: Meiner, 1997), A / Erstes Buch, S. 1.

⁶⁶ Vgl. Lampert, Timm: *Klassische Logik: Einführung mit interaktiven Übungen*, 2., vollst. überarb. Aufl., Logos 5 (Frankfurt: Ontos-Verl., 2005), S. 24.

Somit lässt sich die Methodik der Arbeit zusammenfassen, als eine deduktiv hergeleitete Theorie, die in Form eines Modells dargestellt und angewandt wird.

Damit entsteht eine angewandte Arbeit, wie sie für angewandte Wissenschaften wie die Ingenieurwissenschaft üblich ist: Eine im Kern zweiteilige Arbeit, mit einem theoretischen Teil, in dem die Theorie hergeleitet wird sowie einem praktischen Teil, in dem die Theorie in Form eines Modells angewandt wird. Darauf aufbauend wird das Modell, unter anderem in Form der Ergebnisse, die es liefert, diskutiert und kritisch gewürdigt.

Als Eingabe (Input) des Modells dienen in der Arbeit Beschreibungen der Umwelt, des Status quo. Diese umfassen bspw. statistische Daten hinsichtlich des Verkehrs und allgemeine Regeln der Technik im Bereich der Infrastruktur. Im Modell selbst wird mit Werkzeugen (Verarbeitung/Process) wie der Vernetzungsanalyse, der wirtschaftswissenschaftlichen Nutzenbetrachtung und mathematischen Operationen und Verknüpfungen logisch-deduktiv eine Ausgabe (Output) generiert, die als Lösung für das eingangs beschriebene Problem verstanden werden kann. Damit folgt der Aufbau dem EVA-Prinzip (Eingabe – Verarbeitung – Ausgabe) bzw. IPO-model (input – process – output) der Datenverarbeitung.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der allgemeine Aufbau der Arbeit wird in der folgenden Abbildung 1-3 erläutert.

Dabei dient Kapitel 1 der allgemeinen Einführung in die Arbeit. Es stellt die Motivation der Forschung dar und erläutert neben dem allgemeinen Vorgehen sowohl die angestrebten Ziele der Arbeit als auch die Forschungsmethodik. Darüber hinaus findet eine erste, allgemeine Abgrenzung des Forschungsgegenstandes statt.

In Kapitel 2 sollen allgemeine Begrifflichkeiten erläutert und abgegrenzt werden. Dabei sollen Definitionen aufgegriffen und hinsichtlich der Verwendung innerhalb der Arbeit betrachtet werden. Dadurch soll der Forschungsgegenstand weiter abgegrenzt und das allgemeine Verständnis verbessert werden. Infrastruktur ist, wie in der Einführung bereits dargelegt, ein komplexes Gebiet, welches viele Objekte umfasst. So lassen sich in sozioökonomischer Sicht bereits diverse Unterscheidungen anstellen, ebenso wie in der Betrachtung als Disziplin des klassischen Ingenieurwesens. Darüber hinaus soll auch die Annahme der Infrastruktur als Immobilie erläutert werden.

In Kapitel 3 wird auf den aktuellen Stand der Forschung Bezug genommen. Sowohl im Bereich der volkswirtschaftlichen Bewertung einzelner Infrastrukturobjekte als auch bei der Untersuchung der Kritikalität sind die Grundsteine für eine Bewertung der Maßnahmen in der Erhaltung, einer Schlüsselgröße in der Betrachtung des Lebenszyklus einer Immobilie, derzeit überschaubar.

Dennoch existieren, zumindest interdisziplinär, Ansätze, an die angeknüpft werden kann. Darüber hinaus werden hier die Grundlagen der Instandhaltung angerissen und beschrieben.

In Kapitel 4 soll der Forschungsbedarf hergeleitet und für die aufbauenden Untersuchungen konkret abgesteckt werden. Es beinhaltet Analysen des Status quo der Infrastruktur sowie Kategorisierungen zur Aufarbeitung der Inhalte für die anschließenden Betrachtungen.

In Kapitel 5 werden die Methoden erarbeitet, welche später das Modell bilden sollen. Dazu werden zum einen die sozioökonomischen Aspekte der Infrastruktur untersucht. Es wird eine Methodik entwickelt, die den wirtschaftlichen Nutzen, der durch die Infrastruktur entsteht, messen und vor allem bewerten kann. Ziel ist eine hierarchische Gliederung hinsichtlich der Bedeutung für den Funktionsbetrieb. Dabei handelt es sich um eine Funktion des abgewickelten Verkehrs und dessen Zusammensetzung. Zum anderen wird eine Methodik entwickelt und eine Hierarchie abgeleitet, welche die Funktionseinheiten umfasst, aus denen sich die Infrastrukturobjekte zusammensetzen. Dabei soll die Hierarchie die Bedeutung erfassen, welche die Funktionseinheit für das Objekt hat. Als Indikator gilt letztlich auch hier immer der Funktionsbetrieb, an dessen Beeinflussung sich die Bedeutung erkennen lässt. Außerdem wird eine verbindende Methodik entwickelt, welche die beiden Gliederungsebenen aus den vorherigen Kapiteln vereint und somit eine gesamt betrachtende Struktur ableitet. Dadurch werden Aussagen hinsichtlich der Kritikalität ermöglicht, die ihrerseits Aussagen zur Instandhaltung ermöglicht.

Im sechsten Kapitel wird die Methodik aus dem vorherigen Kapitel konkret umgesetzt. Dazu werden die Autobahnen der Bundesfernstraßen in ihren Elementen Straße, Brücke und Tunnel der hergeleiteten Methodik unterworfen. Hier wird das konkrete Modell abgeleitet, dass die Instandhaltung vor dem Hintergrund der sozioökonomischen wie einzelwirtschaftlichen Aspekte steuert.

Anschließend soll die eigentliche Bewertung stattfinden. Dazu wird das Kritikalitätsmaß bestimmt, auf Basis der Zusammenführung der zweifachen Gliederung. Dieses Maß wird dann hinsichtlich der Eigenschaft verwendet, als Grundlage für eine Mittelzuweisung zum Erhalt der Infrastruktur zu dienen. Der erarbeitete Wert der Zusammenführung wird vor dem Hintergrund der Instandhaltung explizit angewendet. Dadurch lässt sich der Modellablauf als allgemeine Handlungsempfehlung interpretieren. Das Ziel, eine nutzenoptimierte Mittelzuweisung solcherart tätigen zu können, dass der ausfallinduzierte Schaden der Erhaltungsmaßnahmen minimiert wird, soll dort erreicht werden.

Im siebten Kapitel werden die Erkenntnisse und Ergebnisse der Arbeit, vor allem aus den Kapiteln 5 und 6 zusammengefasst dargestellt. Hier soll eine abschließende Betrachtung der Methoden und des Modells stattfinden. Die einzelnen Teilmodelle und das Gesamtmodell sollen zudem vor dem Hintergrund der Schnittstellen zur Außenwelt betrachtet werden, um die Bedeutung für die späteren, praxisorientierten Anwendungsmöglichkeiten abschätzen zu können.

Im abschließenden achten Kapitel wird ein Resümee über die Arbeit gezogen und die gewonnenen Erkenntnisse werden kritisch gewürdigt. Zudem werden ein Ausblick gegeben und Anregungen für den weiteren Forschungsbedarf angerissen, um die Methodik zu erweitern oder neue Bereiche erschließen zu können.

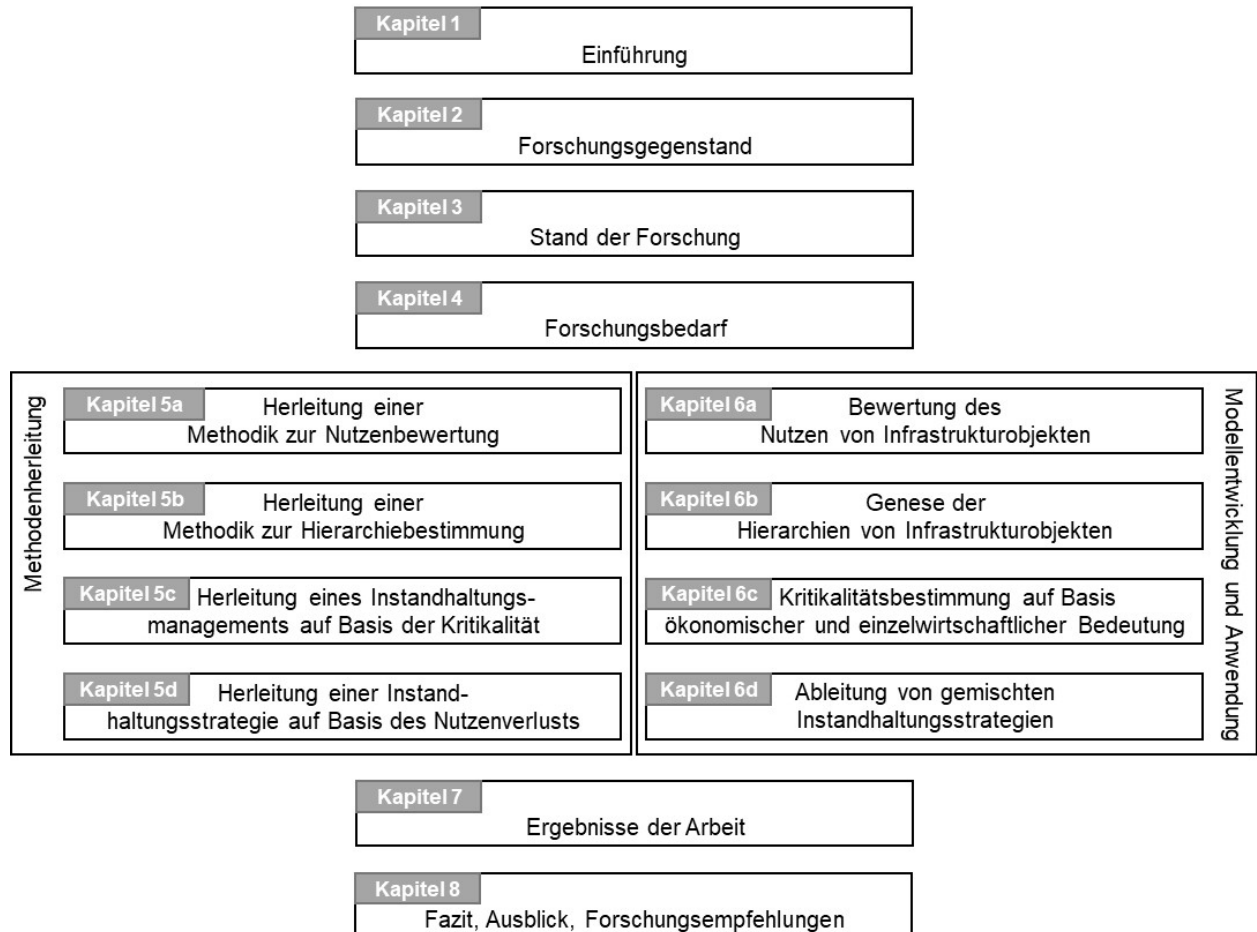


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit

2 Forschungsgegenstand

2.1 Der Begriff der Infrastruktur

„Infrastruktur“, als Derivation des lateinischen Begriffes *structura* mit dem Präfix *infra-* lässt sich mit dem Begriff „Unterbau“ definieren. Es grenzt sich somit von dem Wort „Suprastruktur“ ab und bildet ein Gegenteil. Diese Bedeutungsherleitung ist jedoch unzureichend, da sie dazu verleitet, nur unterirdische Bauwerke als Infrastruktur zu bezeichnen. Eine etymologische Herleitung der Bedeutung ist folglich als ungünstig anzusehen. Infolgedessen ist eine einheitliche Definition des Begriffes notwendig. Jochimsen definierte Infrastruktur im Jahr 1966 wie folgt:

„Infrastruktur wird als Summe der materiellen, institutionellen und personellen Einrichtungen und Gegebenheiten definiert, die den Wirtschaftseinheiten zur Verfügung stehen und mit beitragen, den Ausgleich der Entgelte für gleiche Faktorbeiträge bei zweckmäßiger Allokation der Ressourcen [...] zu ermöglichen.“⁶⁷

Die Definition von Jochimsen wird in der deutschsprachigen Wissenschaft am häufigsten angewandt. Dabei unterscheidet er die Infrastruktur noch weiter. Als *materielle Infrastruktur* bezeichnet er jene Anlagen, Ausrüstungen und Betriebsmittel, die zur Energieversorgung, Erfüllung der Verkehrsbedienung und Telekommunikation dienen sowie die Bauten zur Konservation der natürlichen Ressourcen, dabei vor allem jene der Gewässerhaltung, zu denen unter anderem die stoffliche Ver- und Entsorgung gehören.⁶⁸

Diese aufgezeigten Infrastrukturen weisen in der Regel einen Netzcharakter auf, da sie in ihrem Grundwesen linienförmig sind. Sie können als *technische Infrastruktur* bezeichnet werden.⁶⁹ Dabei sind jedoch auch in der Netzinfrastruktur Punktobjekte anzutreffen, wie bspw. Bahnhöfe innerhalb der (Eisenbahn-)Verkehrsinfrastruktur. Dagegen sind Gemeinbedarfseinrichtungen von punktueller Natur. Diese Infrastrukturen, zu denen bspw. Erziehungs-, Bildungs- und Forschungseinrichtungen zählen, aber auch jene der Gesundheits- und Sozialfürsorge, können als *soziale Infrastrukturen* bezeichnet werden.⁷⁰

⁶⁷ Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 100.

⁶⁸ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 103.

⁶⁹ Vgl. Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J.: *Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung: [Forschungsprojekt des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu) im Auftrag der Wüstenrot-Stiftung]*, Edition Difu - Stadt, Forschung, Praxis 10 (Berlin: Dt. Inst. für Urbanistik, 2010), S. 49.

⁷⁰ Vgl. Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J.: *Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung: [Forschungsprojekt des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu) im Auftrag der Wüstenrot-Stiftung]*, Edition Difu - Stadt, Forschung, Praxis 10 (Berlin: Dt. Inst. für Urbanistik, 2010), S. 49.

Neben der materiellen Infrastruktur unterscheidet Jochimsen weiter in die *institutionelle* und die *personale Infrastruktur*. Die institutionelle Infrastruktur charakterisiert sich dabei durch ihre „Verfassungswirklichkeit“, die sie in Normen, Gesetzen und Verfahrensweisen zum Ausdruck bringt.⁷¹ Die personale Infrastruktur umfasst die Menschen und deren Fähigkeiten und Eigenschaften innerhalb der Marktwirtschaft.⁷² Klassische Merkmale sind Erziehung und (Aus-)bildung⁷³ (Einrichtungen der Erziehung und Bildung gehören jedoch der materiellen Infrastruktur an).

Sowohl die institutionelle als auch die personale Infrastruktur lässt sich inhaltlich durch ihr physisches Wesen von der materiellen Infrastruktur abgrenzen, da sich letztere, als Charakterisierung ihrer Bezeichnung, materiell fassbar darstellt. Somit hat nur die materielle Infrastruktur direkten Einfluss auf die Immobilienwirtschaft.

Die folgende Abbildung 2-1 soll die aufgezeigten Sachverhalte zusammenfassend darstellen:

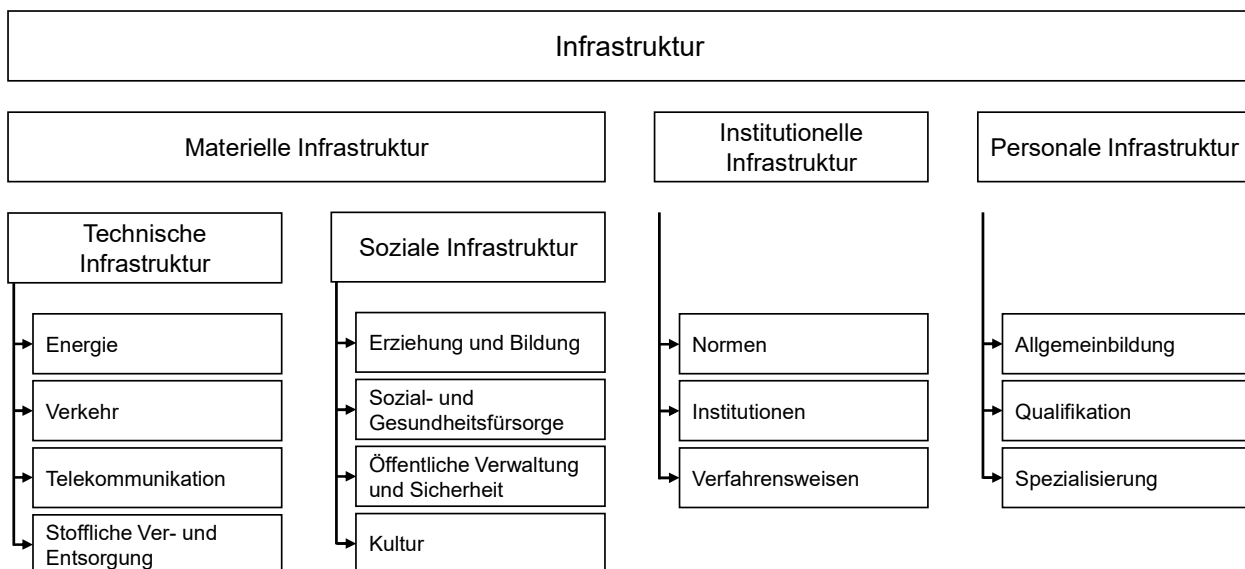


Abbildung 2-1: Kategorien der Infrastruktur⁷⁴

⁷¹ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 117.

⁷² Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 133.

⁷³ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 133.

⁷⁴ Nach Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966) und Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J.: *Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung: [Forschungsprojekt des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu) im Auftrag der Wüstenrot-Stiftung]*, Edition Difu - Stadt, Forschung, Praxis 10 (Berlin: Dt. Inst. für Urbanistik, 2010).

2.2 Infrastruktur als Immobilie

„Immobilien können rechtlich als ‚Grundstücke und deren Bestandteile‘ definiert werden, wobei ein Grundstück einen begrenzten, durch Vermessung gebildeten Teil der Erdoberfläche darstellt.“⁷⁵ Nach § 94 Abs. 1 BGB gehören zu den wesentlichen Bestandteilen des Grundstücks „die mit dem Grund und Boden fest verbundenen Sachen, insbesondere Gebäude“. Das bedeutet, dass unter dem Begriff der „Immobilie“, anders als im allgemeinen Sprachgebrauch oft gemeint, das eigentliche Bauwerk nur einen Teil des Ganzen ausmacht.

In Bezug auf diese Arbeit soll die Immobilie ein Bauwerk darstellen, welches gemäß seiner Funktion genutzt wird. Es grenzt sich aufgrund seiner Abmessungen und seiner Beschaffenheit ab und steht unbeweglich auf einem Grundstück, das dadurch ebenfalls zum Teil der Immobilie wird. Weitere Bestandteile wie „die Erzeugnisse des Grundstücks, solange sie mit dem Boden zusammenhängen“, ausgesäte Samen, eingepflanzte Pflanzen und ähnliches gehören nicht nur durch o. g. Paragraphen zum Grundstück, und damit zur Immobilie, sollen hier aber nicht weiter Berücksichtigung finden.

Nach den oben genannten Definitionen können Einrichtungen der materiellen Infrastruktur als Immobilien verstanden werden. Dabei lässt sich sowohl die Abgrenzung als auch die Begründung für diesen Sachverhalt trivial aus dem Begriff ableiten. So beschreibt das lateinische Wort *immobilis* die „Unbeweglichkeit“ einer Sache und entspricht damit den Definitionen im ersten Absatz. Gleichzeitig grenzt der Sachverhalt der Unbeweglichkeit die Infrastruktur von der Suprastruktur ab, deren Bestandteile beweglich sein können.

2.3 Kritische Infrastrukturen

Basierend auf der Richtlinie 2008/114/EG vom 08. Dezember 2008 über die Ermittlung und Ausweisung europäischer kritischer Infrastrukturen und die Bewertung der Notwendigkeit, ihren Schutz zu verbessern, hat das Bundesministerium des Innern (BMI) im Juni 2009 die nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen – kurz „KRITIS-Strategie“ – veröffentlicht.

„Kritische Infrastrukturen sind dabei Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“⁷⁶

⁷⁵ Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2013), S. 1-1.

⁷⁶ Bundesministerium des Innern: *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen* (Berlin, 2009), S. 3.

Das BMI unterscheidet kritische Infrastrukturen in mehreren Ebenen. Zuerst werden technische Basisinfrastrukturen und sozioökonomische Dienstleistungsinfrastrukturen unterschieden. Weitere Ebenen gliedern sich in verschiedene Sektoren und Branchen entsprechend Tabelle 2-1.

Die in dieser Arbeit untersuchten Branchen sind aufgrund ihrer technischen, strukturellen und funktionellen Spezifika den technischen Basisinfrastrukturen zugeordnet. Sie besitzen eine hohe systemische Kritikalität, d.h., dass bei Ausfall von Bauwerken der Infrastruktur gravierende Auswirkungen auf das gesamte System eintreten.⁷⁷ Hier wird der Begriff „Kritikalität“ genannt, jedoch nur qualitativ verwendet. Eine wirkliche Bewertung ist nicht gegeben.

Bei genauer Betrachtung der Sektoren und Branchen lässt sich erkennen, dass praktisch die gesamte Infrastruktur innerhalb der kritischen Infrastrukturen abbildbar ist, und somit eine Ordnung hinsichtlich des Kritikalitätsaspektes nach dem BMI nicht möglich ist, da hier alles als „kritisch“ angesehen wird. Das untermalt zwar auf der einen Seite die Wichtigkeit der Infrastruktur, stellt aber den Sinn der Auszeichnung einer Infrastrukturbranche als „kritische“ infrage.

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

Tabelle 2-1: Sektoren- und Brancheneinteilung kritischer Infrastrukturen nach BMI⁷⁸

⁷⁷ Bundesministerium des Innern: *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen* (Berlin, 2009), S. 5.

⁷⁸ Vgl. Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): *Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie)* (2011-2017) (20.11.2017).

Wie Abbildung 2-2 des BMI zeigt, liegt der Fokus, unabhängig von den Gefahren im Einzelnen, auf der Prävention. Diese ist, als Aufgabe, die während des Betriebes der Infrastruktur selbst gelöst werden muss, eine Aufgabe des Erhalts und damit auch der Instandhaltung.

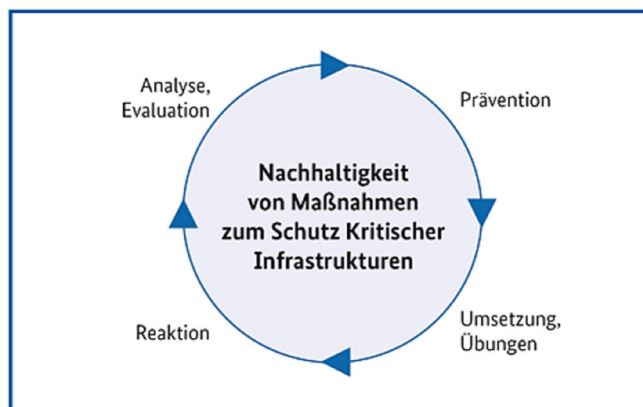


Abbildung 2-2: Nachhaltigkeit von Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen nach BMI⁷⁹

So sind alle Risiken im Vorfeld zu erkennen und kritische Elemente und Prozesse zu identifizieren. Durch entsprechende Maßnahmen, wie ein effizientes Management, sollen adäquate Handlungsoptionen auf ein Mindestmaß reduziert werden. Dieses Gebot der Prävention lässt sich problemlos in den Betrieb von Infrastrukturen im Bereich Wasser und Verkehr übertragen. Eine Instandsetzung ist als präventive Maßnahme gegenüber der Gefahr bzw. dem Risiko des alters- und zustandsbedingten Ausfalls zu sehen. Somit lässt sich die Bedeutung der Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen durch den Kritikalitätscharakter der entsprechenden Infrastruktur ableiten.

2.4 Funktion der (technischen) Infrastruktur

Jochimsen beschreibt die Produkte der materiellen Infrastruktur als Vorleistungen, die in die Produktion von Waren und Dienstleistungen, welche die Endnachfrage bedienen, eingehen. Er beschreibt sie als Grundlage für die Erzeugungen, die zur Befriedigung dieser Endnachfrage notwendig sind und spricht die Wirkung der Investitionen in Infrastruktur ausdrücklich dem Sozialprodukt selbst ab.⁸⁰ Das bedeutet, die Infrastruktur existiert nicht um der Infrastruktur willen, sondern dient einem höheren Zweck. Dabei werden die Vorleistungen den Akteuren der Wirtschaft zur Verfügung gestellt und die Erstellung der Infrastruktur selbst von ihnen nicht verlangt. Akteure können Unternehmen aber auch Haushalte sein, Vorleistungen können materielle Güter wie auch Dienstleistungen sein.⁸¹ Entsprechend dem Charakter der „Vorleistung“

⁷⁹ Bundesministerium des Innern: *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen* (Berlin, 2009), S. 11.

⁸⁰ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 105 f.

⁸¹ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 106.

verstehen sich Investitionen hier als ein gegenwärtiger Aufwand, der künftigen Erträgen entspricht.⁸²

Die Beschreibung nach Jochimsen erläutert gleichzeitig die Notwendigkeit der Infrastruktur. Wo keine Infrastruktur vorhanden ist, wird sich, im Allgemeinen, kein wirtschaftlicher Akteur niederlassen (Unternehmen oder Haushalt). Entfernt man die Infrastruktur an einem Punkt solcherart, dass ein Akteur seinen Zugang verliert, wird er nicht mehr im Rahmen seiner Funktion agieren können.

Zwischen den beiden Zuständen des Vorhandenseins bzw. Fehlens von Infrastruktur bzw. einem Zugang zu dieser, kann, ähnlich der physikalischen Größen von Spannung und Strom, auch die Infrastruktur bewertet werden. Während das Anliegen von Spannung eine notwendige Bedingung für das Fließen von Strom ist, ist die Infrastruktur für das Wirtschaften der Akteure notwendig. Zudem kann, ähnlich einer zu hohen oder zu niedrigen Spannung, die Qualität der Infrastruktur unangemessen auf die Forderungen der Akteure abgestimmt sein. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. So kann die Infrastruktur punktuell geschädigt sein, was einen Umweg bzw. eine Umleitung zur Folge hat, oder die Dimensionierung kann zu gering sein, was einen Stau zur Folge hat. In beiden Fällen entsteht, (teil-)ausfallbedingt, ein volkswirtschaftlicher Schaden.

Die Funktion der Infrastruktur, das Ermöglichen von Wirtschaften (als die planvolle Tätigkeit des Menschen, knappe Mittel oder wirtschaftliche Güter der bestmöglichen Bedürfnisbefriedigung zuzuführen⁸³), ist demzufolge ein Grundgerüst der gesamten Volkswirtschaft. Ohne Infrastruktur ist das „Sein“ einer Volkswirtschaft nicht möglich. Basierend auf diesem Ansatz ergibt sich die Notwendigkeit der funktionsfähigen Infrastruktur für eine funktionierende Volkswirtschaft. Die zu tätigen Investitionen zum Erhalt sind dementsprechend notwendig. Es stellt sich lediglich die Frage nach einer wirtschaftlichen Reihenfolge der Investitionen.

Der Betrieb der Infrastruktur lässt sich somit zusammenfassend als der Betrieb hinsichtlich des Objektes und der Funktion beschreiben. Die Verwendung der Infrastruktur durch die wirtschaftlichen Akteure lässt sich dem Funktionsbetrieb zuordnen. Dieser umfasst die eigentlichen Geschäftsprozesse der Nutzung der Infrastruktur.⁸⁴ Herstellung und Erhalt dagegen werden dem Objektbetrieb zugeordnet. Dieser umfasst die Bewirtschaftung sowie die Finanzierung des Objektes.⁸⁵ Der Objektbetrieb ist Aufgabe der öffentlichen Hand.

⁸² Vgl. Stohler, Jacques: *Zur rationalen Planung der Infrastruktur* in: *Konjunkturpolitik* 1965, Nr. 11 (1965), S. 294.

⁸³ Pollert, Achim; Kirchner, Bernd et al.: *Duden Wirtschaft von A bis Z*, 6. Auflage, Duden (Berlin: Dudenverlag, 2016).

⁸⁴ Vgl. Zimmermann, Josef: *Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre* in: *Bauingenieur* 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

⁸⁵ Vgl. Zimmermann, Josef: *Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre* in: *Bauingenieur* 2015, Nr. 90 (2015), S. 121.

3 Grundlagen und Stand der Forschung

3.1 Ökonomische Bewertung von Infrastrukturobjekten

Das Gebiet der Wirtschaftswissenschaften erstreckt sich über eine sehr weite Spanne. Im folgenden Kapitel soll daher nur eine Übersicht über die für die Arbeit notwendigen Teilbereiche gegeben werden, die aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht (wenngleich sie für Ökonomen eine Trivialität darstellen mögen) notwendig sind. Das betrifft die Ökonomik, den Begriff des „Nutzen“ und dessen Messung sowie die Verkehrsbeschreibung vor ebendiesem Hintergrund.

Wirtschaftspolitischen Akteuren wird im Rahmen ihrer Tätigkeiten eine grundlegende Ahnung ihrer Tätigkeiten zugesprochen. Dabei ist vor allem in Abhängigkeit von ihrer Macht und Verantwortung davon auszugehen, dass „ökonomisches“ Handeln wichtiger ist, je bedeutender eine Institution ist.

Unterstellt man den rational handelnden Institutionen ein Wissen über die Ziele ihres Handelns, lässt sich die tatsächliche Situation mit der wünschenswerten Situation vergleichen. Ergibt ein solcher Vergleich, dass die tatsächliche Situation schlechter ist als die angestrebte, so lässt sich daraus ein Handlungsbedarf ableiten. Dieser Handlungsbedarf ist hinsichtlich seiner Wirtschaftlichkeit zu untersuchen.⁸⁶ Dazu behilft man sich mit Wirtschaftlichkeitsprognosen,⁸⁷ welche die Handlungen und Handlungsalternativen bereits vor der Realisierung (ex ante) untersuchen und vergleichen. Daraus ergibt sich das Gebiet der Wohlfahrtsökonomik.

Zur ökonomischen Bewertung verschiedener wirtschaftlicher Bereiche existieren verschiedene Instrumente. Dabei ist ihnen in der Regel gemein, dass die Quantifizierung einzelner Parameter nicht absolut möglich ist. Definiert man Wirtschaftlichkeit als Quotient aus Ertrag und Aufwand,⁸⁸ ergibt sich die Differenz zwischen Ertrag und Aufwand als (Wirtschaftlichkeits-)Gewinn.⁸⁹ Betriebswirtschaftlich ist gegen diese Aussage kein Einwand einzulegen, jedoch sind die beiden Größen „Ertrag“ und „Aufwand“ monetär zu beziffern. In der volkswirtschaftlichen Betrachtung stellt sich dies als kompliziert heraus. Lässt sich der Aufwand (als Wert aller verbrauchten

⁸⁶ Vgl. Kleinewefers, Henner: *Einführung in die Wohlfahrtsökonomie: Theorie – Anwendung – Kritik* (Stuttgart: Kohlhammer, 2008), S. 18.

⁸⁷ Vgl. Kleinewefers, Henner: *Einführung in die Wohlfahrtsökonomie: Theorie – Anwendung – Kritik* (Stuttgart: Kohlhammer, 2008), S. 18.

⁸⁸ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 38.

⁸⁹ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 38.

Leistungen einer Periode⁹⁰) als Kosten noch vergleichsweise leicht monetär ausdrücken, ist es beim Ertrag (als Wert aller erbrachten Leistungen einer Periode⁹¹) schwierig. Dieser Wert aller erbrachten Leistungen einer Periode entspricht dem volkswirtschaftlichen Nutzen. Der Nutzen wiederum kann zwar in Kenngrößen ausgedrückt werden, aber eine monetäre Bewertung erfordert eine darüberhinausgehende Multiplikation mit einem Kostenkennwert.

Im Folgenden werden einige Begriffe und Sachverhalte beschrieben, die sich auf die Idee der freien Marktwirtschaft beziehen, insbesondere auf die Selbstregulierung der Märkte. Entsprechend der „unsichtbaren Hand“ in Adam Smith' *Der Wohlstand der Nationen*, sorgt der Markt selbst für die effizienteste Allokation der Ressourcen.⁹² Dabei ist es das Bestreben des Einzelnen, seinen Gewinn zu maximieren (Individualismus), was zwangsläufig dazu führt, das Volkseinkommen zu maximieren. Durch das Verfolgen der eigenen Interessen fördert er, so Smith, die Gesellschaft auf bessere Weise, als wenn er gezielt versuche, sie zu fördern.⁹³

3.1.1 Wohlfahrtsökonomische Betrachtung

Der Begriff *Wohlfahrt* entstammt der Übersetzung des englischen Begriffes *welfare* (so auch *welfare economics*). Er bezeichnet in der (Volks-)wirtschaftswissenschaft die Gesamtheit angestrebter gesellschaftlicher Ziele. Diese können bspw. Frieden, Freiheit, Gerechtigkeit, Sicherheit und Wohlstand sein.⁹⁴ Dabei lässt sich *welfare* auch als *Wohlbefinden* übersetzen, die Wohlfahrtsökonomik stellt die Wissenschaft nach dem menschlichen Wohlbefinden dar. Ein weiteres Schlagwort wäre die *Lebensqualität*, wobei auch hier der wirtschaftliche Aspekt gemeint ist. Dabei sind immer die individuelle sowie die gemeinschaftliche Wohlfahrt zu unterscheiden.

Zwischen den einzelnen Komponenten, welche die Wohlfahrt beschreiben können, lassen sich in der Regel Konflikte beobachten. Eine Erhöhung der Präsenz der Vertreter der Exekutive bringt ein erhöhtes Gefühl der Sicherheit mit sich, gleichzeitig sinkt jedoch das Gefühl der Freiheit. Solche Beispiele für Substitute sind in der Wohlfahrtsökonomik die Regel.

⁹⁰ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 39.

⁹¹ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 39.

⁹² Vgl. Smith, Adam: *Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen*, 8. Aufl., Dtv 2208 (München: Dt. Taschenbuch-Verl., 1999), Buch 4, Kap. 2, S. 371.

⁹³ Vgl. Smith, Adam: *Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen*, 8. Aufl., Dtv 2208 (München: Dt. Taschenbuch-Verl., 1999), Buch 4, Kap. 2, S. 371.

⁹⁴ Vgl. Blohm, Dieter: *Wohlfahrtsökonomik*, Gabler Studentexte (Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, 1980), S. 3.

Der gesamtwirtschaftliche Nutzen der Individuen einer Volkswirtschaft als ökonomische Wohlfahrt ist definiert als Summe der Konsumentenrente und der Produzentenrente.⁹⁵ Diese Summe wird auch Wohlfahrt genannt (oder sozialer Überschuss⁹⁶). Die Konsumentenrente entspricht der roten Fläche in Abbildung 3-1, der Differenz zwischen p^* und der (inversen) Nachfragekurve $P(q)$. Liegt der Preis, den der Konsument bereit zu zahlen ist, über dem Preis p^* , so entsteht ihm ein Überschuss in Höhe dieser Differenz. Summiert man diese Differenzen über alle Konsumenten, so erhält man die Konsumentenrente.⁹⁷ Die Produzentenrente entspricht analog der grünen Fläche, entsprechend der Differenz zwischen Preis p^* und Grenzkostenkurve $MC(q)$. Die q -te Einheit erzeugt für den Produzenten einen Überschuss in Höhe der Differenz von Preis p zu den zusätzlichen Kosten $MC(q)$. Die Summe dieser Überschüsse ergibt die ökonomische Rente des Produzenten.⁹⁸ (Der Vollständigkeit wegen entspricht die blaue Fläche den kumulierten Grenzkosten.⁹⁹)

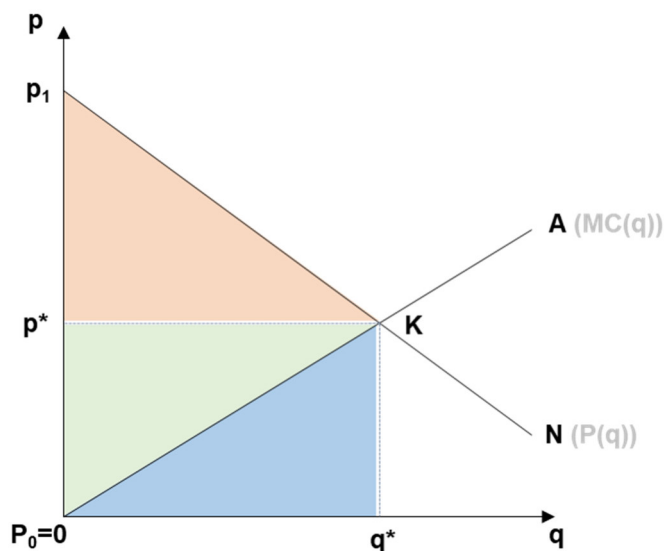


Abbildung 3-1: Resultierende Renten bei qualitativer Angebots- (A) und Nachfragefunktion (N)

Ändert sich die Angebotsfunktion bei gleichbleibender Nachfrage durch die Schaffung einer Alternative A^* , hat dies auch Auswirkungen auf die Wohlfahrt und Renten. In Abbildung 3-2 ist eine solche Alternative aufgezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Konsumentenrente (rot) um a und b steigt. Die Produzentenrente steigt um c, sinkt jedoch gleichzeitig um a. Die gesamte Rente

⁹⁵ Vgl. Weizsäcker, Robert K. Frhr. von: *Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik, TU München, 2013), S. 19.

⁹⁶ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 179.

⁹⁷ Vgl. Weizsäcker, Robert K. Frhr. von: *Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik, TU München, 2013), S. 7.

⁹⁸ Vgl. Weizsäcker, Robert K. Frhr. von: *Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik, TU München, 2013), S. 15.

⁹⁹ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 178.

(Wohlfahrt) steigt um b und c an. Für den Konsumenten ergibt sich auf jeden Fall ein Gewinn, für den Produzenten stellt sich die Frage nach $c - a$. Ist diese Differenz positiv, erfährt auch er einen Gewinn (ist sie negativ, erfährt er einen Verlust; für $c = a$ stellt er sich unverändert, es liegt jedoch eine pareto-Verbesserung vor). Dem Wohlfahrtsgewinn ($b + c$) stehen die Kosten (der Realisierung) der Alternative gegenüber sowie ggf. externe Effekte.

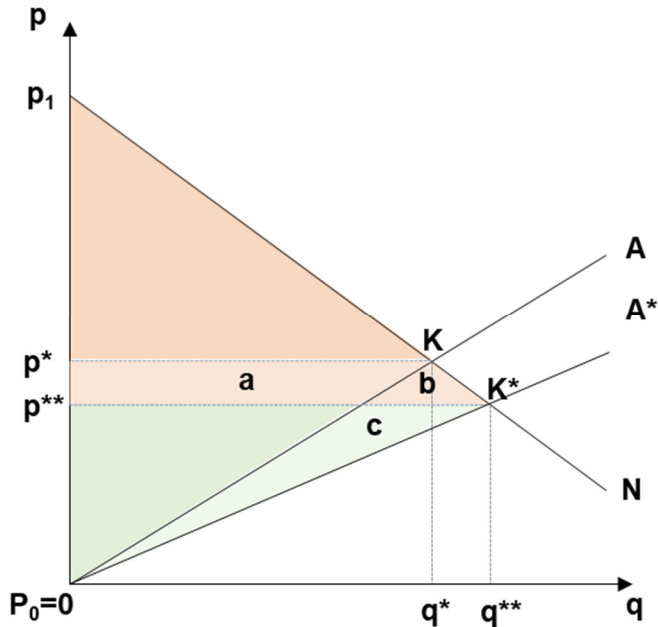


Abbildung 3-2: Auswirkungen durch Alternative A^*

Wird die Summe aus Konsumenten- und Produzentenrente maximiert, führt dies zu einem Wohlfahrtsgewinn und jene Allokation, welche die gesamtwirtschaftliche Wohlfahrt maximiert, heißt Wohlfahrtsoptimum.¹⁰⁰ Ein Mittel, das Wohlfahrtsoptimum zu erreichen, ist der Tausch. Dabei bezeichnet der Tausch die Allokation der Ressourcen. Entsprechend dem ersten Wohlfahrtstheorem ist der Tausch jenes Werkzeug, welches zum Wettbewerbsgleichgewicht führt, das bei vollkommenem Wettbewerb ein Pareto-Optimum (Pareto-optimale-Situation) darstellt. Dabei stellt das Pareto-Optimum jene Allokation dar, die in einer Verkettung des Prozesses „Tausch“ erreicht wird, welches der Auflage folgt, dass beim Tausch kein Akteur schlechter-, mindestens einer aber bessergestellt wird.^{101 102}

¹⁰⁰ Vgl. Weizsäcker, Robert K. Frhr. von: *Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik, TU München, 2013), S. 19.

¹⁰¹ Vgl. Weizsäcker, Robert K. Frhr. von: *Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik, TU München, 2013), S. 16 u.19.

¹⁰² Vgl. Kleinewefers, Henner: *Einführung in die Wohlfahrtsökonomie: Theorie – Anwendung – Kritik* (Stuttgart: Kohlhammer, 2008), S. 64.

Pareto-Effizienz findet sich, zumindest indirekt auch in der Bundeshaushaltsordnung, die besagt, dass ein Ziel sich nicht besser und wirtschaftlicher auf andere Weise erreichen lassen darf.¹⁰³ Auf Ebene der Gemeinden werden Unternehmen hinsichtlich ihrer Zulässigkeit unter die Bedingung gestellt, dass der Zweck nicht ebenso gut und wirtschaftlich durch einen privaten Anbieter erfüllt werden kann.¹⁰⁴ Pareto-spezifisch ausgedrückt, kann sich folglich kein Unternehmen in der Realisierung besserstellen, ohne wenigstens einen Teilnehmer schlechterzustellen. So würde ein höherer Preis bspw. den Auftraggeber schlechterstellen. Diese Art der Beurteilung unterschiedlicher Alternativen (Güterbündel) mithilfe des Pareto-Kriteriums wird paretianische Wohlfahrtsökonomik genannt.¹⁰⁵

Letzteres, die Anforderungen an die Gemeinden bezüglich der Wirtschaftlichkeit, wird auch als Subsidiaritätsklausel bezeichnet. Hier ist dem Privaten Vorrang zu gewähren, sollte er ebenso gut und wirtschaftlich handeln können. Das kann zugleich als Schutz für die Gemeinde vor dem Privaten verstanden werden. Der Ausdruck „gut und wirtschaftlich“ beschreibt mit „gut“ eine Qualität. Das hat zur Folge, dass für eine Vergabe nicht prinzipiell das niedrigste Angebot den Zuschlag bekommen kann. Qualität und Wirtschaftlichkeit sind beide, für sich getrennt, ordinal zu bewertende Kriterien. Beide sind nur bedingt miteinander vergleichbar. So kann eine Maßnahme zwar günstiger sein als eine Alternative, dafür kann mit der Alternative eine höhere Qualität einhergehen. Hier ist eine resultierende, kardinale¹⁰⁶ Beziehung zu bilden, die, wenn sie bspw. in Geldeinheiten gehalten wird, Wirtschaftlichkeit und Qualität gemeinsam ausdrücken kann. Qualität ist dann Bestandteil des Wirtschaftlichkeitskriteriums, und dieses sollte von den Kommunen als Entscheidungskriterium herangezogen werden.¹⁰⁷ Die Kardinalisierung erfolgt mit der Monetarisierung der Qualität.

3.1.2 Der Begriff des Nutzens

Der Begriff des „Nutzen“ aus volkswirtschaftlicher Sicht ist an den Begriff der „Effizienz“ (aus betriebswirtschaftlicher Sicht) angelehnt. Effizienz als Quotient aus wertmäßigem Output zu wertmäßigem Input ist nach Wöhe der allein gültige Maßstab zur Beurteilung betrieblicher Handlungen.¹⁰⁸ Dabei beschreibt der volkswirtschaftliche Begriff Nutzen den betriebswirtschaftlichen Begriff des (wertmäßigen) Outputs.

¹⁰³ Vgl. *Bundeshaushaltsordnung, BHO*, Bundesrepublik Deutschland (19.08.1969), § 65 Abs. 1.

¹⁰⁴ Vgl. *Gemeindeordnung Baden-Württemberg, GemO*, Land Baden-Württemberg (23.02.2017), § 102 Abs. 1 Satz 3.

¹⁰⁵ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Kosten-Nutzen-Analyse* (München: Oldenbourg, 1994), S. 73.

¹⁰⁶ Die ordinale Skala erlaubt einen Vergleich bzw. eine Ordnung mittels „Größer-Kleiner-Aussagen“, die kardinale Skala dagegen darüberhinausgehende Aussagen bzgl. des Abstandes der Aspekte untereinander.

¹⁰⁷ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 15.

¹⁰⁸ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 8.

$$\text{Effizienz} = \frac{\text{wertmäßiger Output}}{\text{wertmäßiger Input}}$$

Formel 3-1: Effizienz als Relation zwischen Out- und Input

So wie die betrieblichen Handlungen im optimalen Markt eine Maximierung des Outputs bei gegebenem Input anstreben (Maximumprinzip)¹⁰⁹, so strebt der Akteur der Volkswirtschaft nach einer Nutzenmaximierung. Die Nutzenmaximierung gilt für alle Akteure, bei Unternehmen spricht man auch von einer Gewinnmaximierung.

Nutzen stellt im entfernten Sinne die Einheit der Messung von Wohlfahrt dar. In der neueren Wohlfahrtsökonomik ist der individuelle Nutzen eine ordinal messbare Größe.¹¹⁰ Unterstellt man dem Individuum rationales Handeln (es untersteht somit dem Rationalprinzip, was dem ökonomischen Prinzip entspricht), wird es stets die Alternative wählen, die bei gegebenen Input den maximalen Output und somit Nutzen generiert (Maximalprinzip; bei einem gegebenen Budget versucht das Individuum (zum Bsp. die öffentliche Hand) das größtmögliche Ergebnis zu erzielen). Für die Erneuerung einer Autobahn bedeutet dies, dass bei einem gegebenen Budget die größtmögliche Zahl an Kilometern erreicht werden soll¹¹¹. Dabei ist jedoch die wirtschaftlich bewertete Kilometerzahl entscheidend. Damit beschreibt der Nutzenbegriff in der neueren Wohlfahrtökonomik das Wahlverhalten eines Individuums.¹¹²

Einen wichtigen Begriff im Zusammenhang mit dem wirtschaftlichen Nutzen eines Gutes vor dem Hintergrund des Rationalprinzips stellen die Opportunitätskosten dar. Beim Wirtschaften mit knappen Gütern stellen Opportunitätskosten die Differenz der eingegangenen Alternative gegenüber der bestmöglichen dar.¹¹³ Ein solcher Verstoß gegenüber dem Rationalprinzip soll zwar in der Theorie nicht erfolgen, ist in der Praxis jedoch aufgrund der Komplexität der Alternativen, vor allem aber auch innerhalb der Bewertung der Alternativen, nicht auszuschließen. Suboptimales Handeln erzeugt Opportunitätskosten und im Umkehrschluss ist die Vermeidung von Opportunitätskosten ein Zeichen wirtschaftlichen Handelns.¹¹⁴ Opportunitätskosten können gemäß dem Begriff des Nutzens auch als entgangener Nutzen interpretiert werden, so kann der Aspekt der Monetarisierung qualitativ zurückgestellt werden.

¹⁰⁹ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 33.

¹¹⁰ Vgl. Blohm, Dieter: *Wohlfahrtsökonomik*, Gabler Studentexte (Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, 1980), S. 8.

¹¹¹ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 8.

¹¹² Vgl. Blohm, Dieter: *Wohlfahrtsökonomik*, Gabler Studentexte (Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, 1980), S. 8.

¹¹³ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 867.

¹¹⁴ Vgl. Piekenbrock, Dirk: *Einführung in die Volkswirtschaftslehre und Mikroökonomie*, BA kompakt (Heidelberg: Physica-Verl., 2008), S. 3.

3.1.3 Messung des Nutzens bzw. Wohlstands

Justitia ist blind. Schon allein vor diesem Hintergrund würde sie sich schwertun, mit ihrer Waage etwas abzumessen. Stattdessen ist die Waage als Symbol zu verstehen, als Metapher für die durchdachte und umfängliche Abwägung der Tatsachen, auf denen schließlich das Urteil aufbaut. Recht und Unrecht lassen sich nicht tatsächlich wiegen. Jedoch könnte Unrecht in einem ordinalen Koordinatensystem vergleichbar gemacht werden. Die Einheit wäre dann die Haftdauer. Je länger die verhängte Haftstrafe, desto schwerwiegender war das Verbrechen. Über eine Behelfseinheit ist somit zumindest eine ordinale Ordnung möglich.

Ähnlich schreibt Blohm über den Zehnkampf.¹¹⁵ Innerhalb der Disziplinen ist eine Vergleichbarkeit problemlos möglich. Wer weiter springt, gewinnt, gemessen wird in Metern bzw. Bruchteilen davon. Der Gesamtsieger ermittelt sich jedoch aus zehn Disziplinen, denen unterschiedliche Bewertungseinheiten zugrunde liegen. Laufdisziplinen werden in Zeiteinheiten gemessen und lassen sich somit nicht direkt mit Weiten vergleichen. Stattdessen ist eine Umrechnung des Ergebnisses jeder Disziplin in Punkte notwendig und eine anschließende Addition ermittelt den Gesamtsieger.

Bezüglich der Messbarkeit von Nutzen ergeben sich zwei grundsätzliche Anforderungen. Zum einen muss es möglich sein, den Nutzen eines Aspektes (zumindest ordinal) messen zu können, zum anderen muss er summier- bzw. vergleichbar sein.

Die Erreichungsgrade in einer Wohlfahrtsfunktion müssen demnach auf einen einheitlichen Nennwert gebracht werden. Dennoch kann die Gewichtung, welche einzelnen Parametern oder Zielen zugrunde liegt, unterschiedlich sein. Somit hat das Ergebnis normativen Charakter und kann, je nach Interpretation, zu unterschiedlichen Aussagen führen.¹¹⁶

Die Messung von Nutzen oder Wohlstand beinhaltet demzufolge sowohl qualitative als auch quantitative Aspekte. Kauft ein Akteur A ein Produkt P1 für einen Preis p_1 , so lässt sich sagen, dass das Produkt ihm einen größeren Nutzen stiftet als Bargeld in Höhe von p_1 . Darin begründet sich seine Entscheidung für den Tausch Bargeld gegen Produkt. Offensichtlich ist auch, dass ein identisches Produkt P1' für einen Preis $p_1' < p_1$ ihm ceteris paribus mehr Nutzen stiften wird als Produkt P1 (Minimumprinzip). Für den externen Beobachter, der die Produkte P1 und P1' sowie deren Preise kennt, ist der Sachverhalt beim Vergleich bereits ex ante offensichtlich und logisch. Er kann jedoch ex ante nicht erkennen, ob A das Produkt für einen Preis p (p_1 oder p_1') überhaupt kaufen wird, da der Nutzen für A erst durch die Entscheidung sichtbar wird.

¹¹⁵ Vgl. Blohm, Dieter: *Wohlfahrtsökonomik*, Gabler Studentexte (Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, 1980), S. 4.

¹¹⁶ Vgl. Blohm, Dieter: *Wohlfahrtsökonomik*, Gabler Studentexte (Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, 1980), S. 4.

Der Nutzen durch das Produkt gegenüber dem gezahlten Preis kann der Ökonom demzufolge nur durch die Beobachtung der Entscheidung ableiten (Dieses Konzept, aus dem Verhalten eines Individuums zu schließen, nennt man Behaviorismus (behavior = Verhalten)). Quantifizierungen sind in diesem Bereich nur bedingt möglich, da eine entscheidende Größe nicht messbar ist, jener Preis, bis zu dem der Akteur bereit ist, das Produkt zu kaufen.

3.1.4 Vergleich und Untersuchung von Wirtschaftlichkeit

Zur Beantwortung der Frage nach der Wirtschaftlichkeit von Organisationseinheiten gegenüber anderen sind Vergleiche notwendig, da es kaum absolute Maßstäbe für Wirtschaftlichkeit gibt. Stattdessen ist der Vergleich ein Instrument, um eine relative Beziehung zwischen den beiden Einheiten sichtbar zu machen.¹¹⁷ Für gleichartige Einheiten werden dabei wirtschaftliche Kennziffern gebildet. Diese können Leistungscharakter besitzen (sie geben geleistete Arbeit pro Zeiteinheit wieder) und dann verglichen werden. Ein Beispiel kann die Zahl an Urteilen eines Gerichts oder Richters pro Zeiteinheit sein. „Benchmarking“ baut auf diesen Vergleichen auf, indem es die besten Werte als Maßstab setzt.¹¹⁸ Solche Vergleichsmöglichkeiten werden zwar nicht explizit gefordert, stehen implizit jedoch als probates Mittel zur Verfügung. So können Bund und Länder „zur Feststellung und Förderung der Leistungsfähigkeit ihrer Verwaltungen Vergleichsstudien durchführen und die Ergebnisse veröffentlichen“.¹¹⁹

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen dienen dem Finden der wirtschaftlichsten Alternative. Dabei stellt die Nichtdurchführung einer Maßnahme prinzipiell eine Alternative dar. Das impliziert auch, dass zu jedem Vorhaben mindestens eine Alternative, der Status quo, besteht. Die Eingriffe eines Staates in die Infrastruktur, bzw. die Volkswirtschaft allgemein, unterliegen dem ökonomischen Prinzip, jenem Grundsatz der Wirtschaftstheorie, der ein wirtschaftliches Handeln mit knappen Ressourcen zur Erreichung wirtschaftlicher Ziele begründet.¹²⁰ Dieses Prinzip und das Verlangen nach angemessenen Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ergibt sich durch diverse Gesetze wie das Haushaltsgrundsätzegesetz,¹²¹ die Bundeshaushaltsordnung¹²² oder auch das Grundgesetz.¹²³

¹¹⁷ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 20.

¹¹⁸ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 21.

¹¹⁹ *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*, GG, Parlamentarischer Rat (23.05.1949), Art 91d.

¹²⁰ Vgl. Pollert, Achim; Kirchner, Bernd et al.: *Duden Wirtschaft von A bis Z*, 6. Auflage, Duden (Berlin: Dudenverlag, 2016).

¹²¹ Vgl. *Gesetz über die Grundsätze des Haushaltsrechts des Bundes und der Länder, Haushaltsgrundsätzegesetz - HGrG*, Deutscher Bundestag (19.08.1969), § 6 Abs. 2.

¹²² Vgl. *Bundeshaushaltsordnung, BHO*, Bundesrepublik Deutschland (19.08.1969), § 7.

¹²³ Vgl. *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*, GG, Parlamentarischer Rat (23.05.1949), Art 114 Abs. 2.

Die beiden Begriffe Wirtschaftlichkeitsvergleich und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung liegen sehr nahe beieinander und werden in der Literatur teilweise synonym verwendet. Dieser Sachverhalt macht auch vor dem Landesrecht nicht halt.¹²⁴ Darüber hinaus ist auch die Beschränkung auf finanzwirksame Leistungen nicht notwendig. Als Beispiel für eine nicht finanzwirksame Maßnahme kann die Gesetzfolgenabschätzung angesehen werden.¹²⁵ Leitfäden hierzu bieten auf nationaler Ebene das Bundesministerium des Innern¹²⁶ sowie auf internationaler Ebene die Europäische Kommission.¹²⁷

3.1.5 Kosten-Nutzen-Analyse

Ein anerkanntes Werkzeug der Wohlfahrtökonomik zur Wirtschaftlichkeitsuntersuchung ist die Kosten-Nutzen-Analyse (auch Nutzen-Kosten-Analyse). Durch die aufgezeigten Anforderungen an die öffentliche Hand hat sich diese Methodik als anerkanntes Bewertungsverfahren bewährt. Für die Anwendung der Analyse im Bereich der Verkehrsinfrastruktur lassen sich national vier Beispiele im Bereich der Verkehrsplanung aufzeigen:

Im *Bundesverkehrswegeplan (BVWP)* des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), aktuell als „Bundesverkehrswegeplan 2030“, mit dem Ziel einer leistungsfähigen Infrastruktur für reibungslose Mobilität im Personen- und Güterverkehr.¹²⁸

In den *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen (EWS)* als Grundlage für die volkswirtschaftlichen Beurteilungen von Straßenbauinvestitionen nach einheitlichen Grundsätzen.¹²⁹

In der Berechnung der *Volkswirtschaftliche[n] Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland* der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), die jährlich die Kosten von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland berechnet und veröffentlicht.¹³⁰

¹²⁴ Vgl. exemplarisch *Gemeindehaushaltsverordnung Baden-Württemberg, GemHVO*, Innenministerium Baden-Württemberg (01.01.2010), §12 Abs. 1.

¹²⁵ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 25.

¹²⁶ Vgl. Bundesministerium des Innern: *Arbeitshilfe zur Gesetzesfolgenabschätzung* (Berlin, 2009), https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/themen/verfassung/gesetzgebung/arbeitshilfe-gesetzesfolgenabschaetzung.pdf;jsessionid=06D8970B1A527DA75192847B8E68BCE2.2_cid287?__blob=publicationFile&v=2.

¹²⁷ Vgl. European Commission: *Impact Assessment Guidelines* (2009), http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/commission_guidelines/docs/iag_2009_en.pdf.

¹²⁸ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundesverkehrswegeplan 2030* (Berlin, 2016), S. 1.

¹²⁹ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), Vorwort.

¹³⁰ Vgl. Baum, Herbert; Kranz, Thomas; Westerkamp, Ulrich: *Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland*, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: M, Mensch und Sicherheit 208 (Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. f. Neue Wiss, 2010), S. 7.

In der Anleitung der *standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personenverkehrs (ÖPNV)* als Darstellung eines Verfahrens zur Beurteilung von Investitionsmaßnahmen für den öffentlichen Verkehr sowie einer Anleitung für die praktische Anwendung.¹³¹

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist ein gesamtwirtschaftliches, bewertendes Verfahren.¹³² Sie ist dadurch gekennzeichnet, dass die eintretenden Wirkungen gegenüber allen partizipierenden Parteien berücksichtigt werden. Im Gegensatz dazu würden einzelwirtschaftliche Bewertungsverfahren nur die Auswirkungen einer Partei, in der Regel des Initiators, untersuchen.

Neben der Kosten-Nutzen-Analyse existieren auch andere Analysen. Die Nutzwertanalyse transformiert Projektwirkungen in Punkte und vergleicht dann Alternativen. Die mit dem höchsten Wert wird dabei favorisiert. Dabei wird sie jedoch dem normativen Individualismus der Wirtschaftsökonomik nicht gerecht, da die Analyse eher als Werkzeug auf Seiten der Planer verwendet wird.¹³³ Die Kosten-Wirksamkeits-Analyse stellt dagegen Kosten den Wirkungen gegenüber. Die Wirkungen werden durch Indikatoren ausgedrückt und erzeugen letztlich einen Nutzwert.¹³⁴ Beide Verfahren können als Alternativenvergleich verwendet werden, können jedoch nicht ohne weiteres erkennen, ob der Nutzen die Kosten übersteigt.¹³⁵ Somit kann die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Maßnahme an sich nicht eindeutig gerechtfertigt werden.

Hier greift ein entscheidender Unterschied der Kosten-Nutzen-Analyse, da diese sämtliche untersuchten Einflüsse monetarisiert. Das bedeutet, dass auch eine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme an sich überprüft werden kann und nicht nur der Vergleich gegenüber anderer Alternativen. Darüber hinaus können zudem Grenznutzen und Grenzkosten bestimmt werden.¹³⁶ Die Nichtrealisierung des untersuchten Projekts wird dementsprechend als mögliche Alternative angesehen. Die Herausforderung der Kosten-Nutzen-Analyse liegt in der Monetarisierung der einzelnen Einwirkungen innerhalb des Projekts. Dabei gibt es Wirkungen, die aufgrund bestimmter Kosten- oder Nutzenarten leicht bestimmbar sind, während andere Kategorien eine

¹³¹ Vgl. Intraplan Consult GmbH im Auftrag des Bundesministers für Verkehr: *Anleitung für standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personenverkehrs – Band 1* (Düsseldorf, München, 1981), S. 1.

¹³² Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 182.

¹³³ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 182.

¹³⁴ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 182.

¹³⁵ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 183.

¹³⁶ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 183.

monetäre Bezifferung nur schwer zulassen.¹³⁷ In der Betriebswirtschaft sind diese Monetarisierungen relativ einfach (z.B. in einer Gewinn- und Verlustrechnung). Auf gesamtwirtschaftlicher oder gesellschaftlicher Ebene ist es jedoch mitunter problematischer.¹³⁸ Denn die Monetarisierungen mancher Wirkungen erweisen sich in der Praxis als schwierig. In diesen Bereich können bspw. Leben und Gesundheit fallen. Hier sind Monetarisierungen nicht nur schwierig, sondern auch moralisch fragwürdig. Nichtsdestotrotz ist im Prinzip alles monetär bewertbar, die Frage, die sich stellt, ist lediglich die Qualität dieser Bewertung.

Zusätzlich zur Monetarisierung wird der Zeitpunkt des Entstehens der Kosten und Nutzen berücksichtigt. Dazu werden die Zeitpunkte auf einen Referenzzeitpunkt bezogen. Analog zur (betriebswirtschaftlichen) Kapitalwertmethode werden zukünftige Ein- und Auszahlungen, hier als Kosten und Nutzen, auf die Gegenwart mittels eines Zinsfaktors bezogen (Diskontierung bzw. Ermittlung des Nettobarwerts).¹³⁹

$$K_0 = \sum_{t=0}^n (E_t - A_t) * (1 + i)^{-t} \cong \sum_{t=0}^n (N_t - K_t) * (1 + i)^{-t}$$

Formel 3-2: Nettobarwert¹⁴⁰

Die dem Investitionsvorhaben zurechenbaren Einzahlungen (E_t) werden als monetarisierter Nutzen (N_t) ausgedrückt und die zurechenbaren Auszahlungen (A_t) als Kosten (K_t), jeweils zur Periode t mit dem Kalkulationszinsfuß i .

Aus monetarisierten Nutzen und Kosten kann der Quotient gebildet werden und gegen 1 (100 %) verglichen werden:

$$\frac{\text{Nutzen [€]}}{\text{Kosten [€]}} (\dots) 1$$

Formel 3-3: Quotient aus Nutzen und Kosten als Unterscheidungsmerkmal

Der Quotient zwischen Nutzen und Kosten erlaubt drei mögliche Szenarien: Ist er kleiner (<) als 1, so ist die untersuchte Maßnahme nicht wirtschaftlich, da die Kosten den Nutzen übersteigen. Ist er größer (>) als 1, so übersteigt der Nutzen die Kosten und es liegt eine (positive) Wirtschaftlichkeit vor. Ist der Quotient gleich (=) 1, entspricht der Nutzen den Kosten. Untersucht

¹³⁷ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 183.

¹³⁸ Vgl. Kleinewefers, Henner: *Einführung in die Wohlfahrtsökonomie: Theorie – Anwendung – Kritik* (Stuttgart: Kohlhammer, 2008), S. 220.

¹³⁹ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 184.

¹⁴⁰ Vgl. Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit: *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*, 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage, Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (München: Verlag Franz Vahlen, 2016), S. 487.

man mehrere Alternativen, so ist wirtschaftlich betrachtet jene Alternative zu wählen, die den höchsten Quotienten aufweist, mindestens aber den Wert 1 erreicht. Hier können auch Restriktionen im Budget berücksichtigt werden: Dabei werden nur Alternativen untersucht, deren Kostenwert unter dem vorgegebenen Wert liegen. Ggf. wirtschaftlichere, jedoch zu teure Alternativen werden so ausgeschlossen. Es wird dann zu einer beschränkten Wohlfahrtsmaximierung kommen.¹⁴¹ Ein Variantenvergleich, der mindestens zwei Alternativen vergleicht, kann demzufolge zu zwei Aussagen gleichzeitig kommen: Zum einen wird er die Alternativen in der Reihenfolge ihrer Wirtschaftlichkeit sortieren, zum anderen wird er aussagen, ob auch die wirtschaftlichste Alternative überhaupt eine (positive) Wirtschaftlichkeit aufweist.

Die Kosten-Nutzen-Analyse ist mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden und erfordert einen gewissen Sachverstand. Die Fähigkeit administrativer Ebenen reicht im Allgemeinen für die Bewältigung nicht aus. Spezialisierte Analytiker stehen in entsprechenden Instituten bzw. Büros bereit, diese Aufgaben zu übernehmen.¹⁴²

Ein zentraler Vorteil der Kosten-Nutzen-Analyse ist die Transformation der Einheiten in Geldeinheiten. Erst dadurch sind Identifikation und Aussagen bzgl. der absoluten Vorteilhaftigkeit einzelner Alternativen möglich. Sie betrachtet zudem Präferenzen aus der Sphäre der Betroffenen und nicht aus der Sphäre von Planern, Politikern oder Ähnlichen. Eine Unmöglichkeit der Quantifizierungen einzelner Projektwirkungen ist vor dem Hintergrund der Entwicklung der Methodik in den letzten 30 Jahren praktisch ausgeschlossen, wenngleich der Aufwand in manchen Bereichen überdurchschnittlich hoch werden kann.¹⁴³

3.1.6 Variablen einer Nutzenbestimmung am Beispiel der Verkehrsinfrastruktur

Bei Anwendung einer Kosten-Nutzen-Analyse zur Alternativenanalyse findet, wie bereits beschrieben, eine Wirtschaftlichkeitsuntersuchung der einzelnen Alternativen automatisch statt.

Im Folgenden soll ein Überblick über die Variablen gegeben werden, welche die „Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen“ berücksichtigen, die, da sie auf den *Richtlinien für die Anlage von Straßen (RAS)* basieren, als technisches Regelwerk anerkannt sind. Sie geben Überblick und bilden die Grundlage für die Bewertung von Nutzen. Dabei verfahren sie nach dem Prinzip *Menge multipliziert mit einem Kennwert* innerhalb der verschiedenen Bereiche.

¹⁴¹ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*, 1. Aufl. (Wiesbaden: Gabler, 2010), S. 185.

¹⁴² Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 188.

¹⁴³ Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 189.

Die einzelnen Nutzenkomponenten (in der EWS Kostensätze genannt) unterteilen sich in die folgenden:

Die **Betriebskosten** enthalten zwei weitere Ansätze für Kosten. Zum einen die *Grundwerte*, als Abschreibungssatz für die Abschreibungen der Fahrzeuge, Instandhaltungen, Wartung, Reifenverschleiß und Ölverbrauch. Sie sind abhängig von der Fahrleistung. Dementsprechend werden die Fahrzeuggruppen unterschieden sowie der Kennwert in Abhängigkeit von der Entfernung, die auf einzelne Gruppen entfällt. Zum anderen wird der *Kraftstoffverbrauch* berücksichtigt, der sich in Benzin und Diesel unterscheidet und bezogen auf Volumen oder Masse berechnet wird.¹⁴⁴

Die **Zeitkostenansätze** spiegeln den Nutzen aus Änderung der Fahrzeiten wider. Hier sollen Vorhalte- und Lohnkosten bei gewerblich genutzten und Zeitkosten bei privat genutzten Fahrzeugen berücksichtigt werden. Dazu unterscheidet die EWS die Fahrzeuggruppe sowie die Zeitkostensätze in Abhängigkeit von der Anzahl und Zeit, bezogen auf Werk- und Urlaubswerktag sowie Sonntage.¹⁴⁵

Die **Unfallkostenansätze** sollen die resultierenden Produktionsausfälle, Wohlfahrtsverluste durch Invalidität, Freizeitausfälle, medizinische Behandlungskosten, Reparaturkosten für Fahrzeuge, Verwaltungs- und Versicherungskosten, Rechtsfolgekosten und Polizeikosten abdecken. Die Kosten werden auf den einzelnen Unfall bezogen, in Abhängigkeit von Schaden (Personen- oder Sachschaden), dem Unfallort (inner- oder außerorts) sowie der Art der Straße.¹⁴⁶

Der Kostensatz der **Lärmbelastung** ergibt sich aus dem Lärm-Einwohner-Gleichwert der Betroffenen. Dabei wird die Lärmbetroffenheit der Einwohner abhängig von ihrer Entfernung neben der untersuchten Straße berücksichtigt. Der Lärm-Einwohner-Gleichwert ergibt sich als Summe der Gleichwerte der einzelnen Abstände, die wiederum als Produkt der Anzahl der betroffenen Einwohner, der Straßenlänge und dem Lautheitsgewicht des Abstandes beschrieben wird.¹⁴⁷ Maßgebende Einflussgröße ist dabei die durchschnittliche Verkehrsbelastung.

Zur Bewertung der **Schadstoffbelastung** werden die emittierten Schadstoffe (in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung von Normal- und Schwerverkehr) mittels Toxizitätsfaktoren zu NO_x-Äquivalenten zusammengefasst. Mittels Ausbreitungskoeffizienten werden die Konzentrationen an bestimmten, maßgebenden, Punkten ermittelt. Diese werden dann mit den betroffenen

¹⁴⁴ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 13.

¹⁴⁵ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 13.

¹⁴⁶ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 13.

¹⁴⁷ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 14 u. 38.

Einwohnern multipliziert (sowie dem Kostenkennwert). Ferner wird ein weiterer Kostensatz für die Beeinflussung der Vegetation angesetzt.¹⁴⁸

Die **Klimabelastung** wird durch Multiplikation der CO₂-Emissionen mit einem Kostenkennwert bestimmt.¹⁴⁹

Die **Trennwirkung von Straßen** ergibt sich mittels einem Kostenkennwert sowie dem gewogenen Mittelwert der Querungen, wenn ein Drittel in der Arbeitszeit und zwei Drittel außerhalb der Arbeitszeit stattfinden.¹⁵⁰

Die **Flächenverfügbarkeit** wird unter Berücksichtigung der Aufenthaltsflächen für Fußgänger und Radfahrer mittels Multiplikation mit einem Kennwert bestimmt.¹⁵¹

Innerhalb der einzelnen Komponenten wird in der Regel eine Rechnung eines Vergleichsfall mit einem Planungsfall durchgeführt. Dadurch wird ein Nutzen ermittelt, der sich einstellt, sollte der Planungsfall ausgeführt werden und den Vergleichsfall (den Status quo) ersetzen.

Betrachtet man diese Systematik, so lässt sie sich erweitern: Der Nutzen könnte auch negativ sein. Dann würde sich der Planungsfall gegenüber dem Vergleichsfall nicht lohnen. Zudem kann, statt der beiden Fälle, nur der Status quo betrachtet werden und mit anderen (anderer Abschnitte) verglichen werden. Voraussetzung wäre, dass beide Abschnitte vergleichbar sind. Dabei kann zwischen beiden Fällen eine ordinale Beziehung geschaffen werden, welche die Bedeutung der Abschnitte miteinander in eine Beziehung setzt. Zudem können einzelne Aspekte ausgeschlossen werden. Die Querungen oder Flächen für Fußgänger einer Autobahn existieren schlichtweg nicht, da solches nicht vorgesehen ist (höhenfreie Kreuzungen stören den Verkehrsfluss nicht). Weiter kann die Lärmbelastung gegenüber Menschen für den außerörtlichen Verkehr oft ignoriert werden. Belastungen können für mehrere Abschnitte auch als identisch angesehen werden (z.B. Lärmbelastung für Umwelt bei Autobahnen gleicher Ausführung), was dazu führt, dass ihre Auswirkungen bei einem Vergleich der Bedeutung unabhängiger (aber gleichartiger) Abschnitte nicht weiter zu berücksichtigen sind.

Ähnliches gilt für die Kostenkennwerte: Diese haben derzeit den Stand von 1995. Diese müssen auf den jeweiligen Preisstand angepasst werden, wenn Aussagen im Rahmen der Anforderungen an die EWS getätigt werden sollen. Aussagen zur wirtschaftlichen Bedeutung können

¹⁴⁸ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 14.

¹⁴⁹ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 14.

¹⁵⁰ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 14.

¹⁵¹ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 14.

vergleichsweise einfach getätigt werden, wenn sie nur ordinaler Natur sein sollen, da hier lediglich das Verhältnis des jeweiligen Nutzens entscheidend ist.

Dadurch ermöglicht die Kosten-Nutzen-Analyse nach EWS eine Untersuchung der Bedeutung von Streckenabschnitten über ihre eigentliche Auslegung hinaus. Weiter dominieren als Parameter die Verkehrsstärke sowie die Zusammensetzung des Verkehrs, wenn die Streckenbedeutung mittels Nutzen angesehen werden soll.

Die entscheidende Größe bei der Berechnung der (volks-)wirtschaftlichen Bedeutung eines Streckenabschnittes ergibt sich letztendlich aus dem darauf abgewickelten Verkehr, wobei zwischen Personenkraftfahrzeugen und Güterkraftfahrzeugen unterschieden werden muss. Dies wird innerhalb der EWS in den Betriebskosten berücksichtigt. Das Unfallgeschehen ist direkt von der verkehrlichen Belastung abhängig, darüber hinaus vom verwendeten Querschnitt.

Für eine Berechnung der Bedeutung heißt das, dass lediglich die Fahrzeuge und ihre Intention zu berücksichtigen sind. Letztendlich bedeutet es, dass die wirtschaftliche Bedeutung eines Streckenabschnittes davon abhängig ist, welche gewichtete Verkehrsleistung er abwickelt. Gewichtet bedeutet in dem Fall, dass Güterverkehr anders zu gewichten ist als Personenverkehr.

3.1.7 Anwendung wirtschaftlicher Bewertung von Infrastrukturerhaltungsmaßnahmen

In der Praxis findet innerhalb der Erhaltung der Infrastruktur die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsmaßnahmen die Anwendung des Pavement Management Systems (PMS, vgl. auch 3.3.9.5) statt. Eine kritische Betrachtung dieser Anwendung wurde innerhalb eines Forschungs- und Entwicklungsvorhabens des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015 realisiert.¹⁵² Dort wird unter anderem kritisiert, dass in die Berechnung und Bestimmung der Baulasträgerkosten in der Vergangenheit mehr Aktivität geflossen sei, als in die Bestimmung der Nutzerkosten.¹⁵³ Gleichzeitig wurden in dem Forschungsvorhaben Kennzahlen zur Bewertung ermittelt. Diese basieren auf 8 Untersuchungsnetzausschnitten, davon 4 auf Bundesautobahnen. Die Berechnung erfolgt im Allgemeinen konform zu den Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen der FGSV.

Da die Kennzahlen auf das PMS ausgerichtet sind, wird dem Zustand des untersuchten Objektes eine zentrale Rolle zugeordnet. Dieser Zustand als Schlüsselkomponente in der Bewertung stellt den Scheidepunkt zur Intention der Bewertung vor dem Hintergrund dieser Arbeit dar. Der Zustand wird über eine Änderung, die er erfährt, wenn eine Maßnahme ausgeführt wird,

¹⁵² Socina, Mihai; Komma, Christian: *Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien*, Forschung – Strassenbau und Verkehrstechnik 1113 (Bremen: Wirtschaftsverlag NW, 2015).

¹⁵³ Vgl. Socina, Mihai; Komma, Christian: *Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien*, Forschung – Strassenbau und Verkehrstechnik 1113 (Bremen: Wirtschaftsverlag NW, 2015), S. 45.

beschrieben. Im Rahmen der Arbeit soll der Wert jedoch allein vom Nutzen des Verkehrs, unabhängig vom Zustand, sehr wohl aber unter Berücksichtigung der Einschränkung der Maßnahme, betrachtet werden. Die Verkehrsbetrachtung erfolgt so im Sinne der makroskopischen Verkehrsbetrachtung, während die Berücksichtigung des Zustandes mehr einer semi-mikroskopisch-makroskopischen Betrachtung entspricht.

Dennoch ist die Bewertung, wie sie innerhalb des Forschungsvorhabens etabliert wurde, vor dem Hintergrund der Planung der konkreten Maßnahmenausführung von hoher Relevanz und wird sich voraussichtlich sehr gut mit den angestrebten Resultaten dieser Arbeit ergänzen, da die beiden Grundlagen der Arbeiten, die Verkehrsinfrastruktur und der Verkehr selbst, die beiden fundamentalen Bestandteile der Verkehrsabwicklung darstellen.

3.2 Grundlagen/Kritikalität in der Zuverlässigkeitssystemtheorie

Das Gebiet der Zuverlässigkeitssystemtheorie (Zuverlässigkeitstechnik) entstammt dem Bereich der Luft- und Raumfahrt. Unter anderem bei der Entwicklung der Fi 103 in Peenemünde in den 1940er Jahren wurden, aufgrund des Versagens unterschiedlichster Komponenten mit teils fatalen Folgen, erstmals wahrscheinlichkeitstheoretische Überlegungen zur Bewertung der Zuverlässigkeit angestellt.¹⁵⁴

Mittlerweile ist die Zuverlässigkeitstechnik eine eigene ingenieurwissenschaftliche Disziplin. Sie findet in fast allen technischen Sparten Anwendung, um Systeme, Produkte und Produktionsmittel probabilistisch und sicherheitstechnisch zu bewerten.¹⁵⁵

Kritikalität kann sich auf Systeme, Prozesse oder Einheiten beziehen. Das bedeutet, dass auf jeder Ebene eine Ausfallbedeutung bestimmt werden kann. Eine Einheit soll sich, sofern nicht explizit anders ausgedrückt, auf eine Funktionseinheit beziehen. Die DIN 31051 verwendet diesen Begriff, jedoch ohne ihn zu definieren, im Kontext der Betrachtungseinheit. Eine Funktionseinheit soll als eine Einheit aus mindestens einem Teil, die eine Funktion abgrenzt, verstanden werden. Die Summe der Funktionen ergibt dann die Funktion des Objektes, welche die Grundlage des Funktionsbetriebs darstellt.

¹⁵⁴ Vgl. Meyna, Arno; Pauli, Bernhard: *Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren*, 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource], Praxisreihe Qualitätswissen (München: Hanser, 2010). doi:10.3139/9783446424326, S. XVII.

¹⁵⁵ Vgl. Meyna, Arno; Pauli, Bernhard: *Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren*, 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource], Praxisreihe Qualitätswissen (München: Hanser, 2010). doi:10.3139/9783446424326, S. XVII.

3.2.1 Der Begriff der Kritikalität

Der Dudenverlag beschreibt mit dem Wort „Kritikalität“ die „große Wichtigkeit von etwas, dessen Verlust eine existenzielle Gefährdung darstellen würde (z.B. Bedeutung einer Ressource, deren Wegfall den Fortbestand eines Wirtschaftszweigs bedroht; besondere Sensibilität einer Kommunikationsverbindung)“.¹⁵⁶ Diese Wortbedeutung ist konform mit dem wesentlich bekannteren Adjektiv „kritisch“, das eine starke Gefährdung des Bezugsobjektes ausdrückt.

Die Begriffe „kritisch“, „Kritikalität“ oder auch „Krise“ sind im allgemeinen Sprachgebrauch negativ konnotiert. Die Wortherkunft aus dem griechischen *krínein* (entscheiden, urteilen) ebenso wie *kritikós* (zur entscheidenden Beurteilung gehörend) implizieren dies jedoch nicht. Die negative Konnotation ist im Prinzip umgangssprachlicher Natur. Eine Kritik kann ebenso positiv sein. Generell spricht die Kritikalität demzufolge eine Bedeutung zu, ohne selbst zu urteilen, sehr wohl aber zu bewerten.

Während der Begriff „Kritikalität“ (bzw. das Synonym „Ausfallbedeutung“) im Allgemeinen zwar weitläufig aber dennoch eindeutig definiert ist, wird in den verschiedenen wissenschaftlichen Gebieten, in denen der Begriff offiziell verwendet wird, aufgrund der Individualität der Gebiete eine genauere Begrenzung des Begriffes notwendig. Im Folgenden soll die Kritikalität innerhalb dieser Gebiete beschrieben werden und so eine Auffassung für die weitere Verwendung des Begriffes begründet werden.

Von der Gefährdung unterscheidet sich die Kritikalität durch die Bewertung der Bedeutung. Wird die Wahrscheinlichkeit einer Gefährdung geschätzt, handelt es sich um eine klassische Gefährdungseinschätzung. Die Bedeutung, welche dieser Gefährdung innewohnt, wird durch die Kritikalität beschrieben.¹⁵⁷

Die Gefährdung, die von einem Fluss ausgeht, besteht in seiner Fähigkeit, über die Ufer zu treten. Die Bedeutung dieser Gefährdung ist jedoch nicht immer gleich. Sie ist bspw. dort, wo viele Menschen wohnen, höher als auf unbebautem Gebiet. Dazu kommt die Tatsache, dass in Gebieten, in denen Hochwasser häufiger vorkommt, die Menschen damit besser umzugehen wissen. In diesen Gebieten ist die Verwundbarkeit, die Anfälligkeit gegenüber dem Schaden, geringer. Bis zu einem gewissen Grad existiert zwischen Schadenshäufigkeit und -schwere somit eine gewisse Ambivalenz.¹⁵⁸

¹⁵⁶ Dudenredaktion (o. J.): „*Kri-ti-ka-li-tät, die*“ auf Duden online. (Abrufdatum: 21.12.2017). Bibliographisches Institut GmbH.

¹⁵⁷ Vgl. Fekete, Alexander: *Schlüsselbegriffe im Bevölkerungsschutz zur Untersuchung der Bedeutsamkeit von Infrastrukturen: von Gefährdung und Kritikalität zu Resilienz und persönlichen Infrastrukturen in: Krisenmanagement – Notfallplanung – Bevölkerungsschutz: Festschrift anlässlich 60 Jahre Ausbildung im Bevölkerungsschutz, dargebracht von Partnern, Freunden und Mitarbeitern des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe*, hrsg. v. Christoph Unger, Thomas Mitschke und Dirk Freudenberg (Berlin: Duncker & Humblot, 2013), S. 331.

¹⁵⁸ Beispiel dem Grunde nach aus Fekete, Alexander: *Schlüsselbegriffe im Bevölkerungsschutz zur Untersuchung der Bedeutsamkeit von Infrastrukturen: von Gefährdung und Kritikalität zu Resilienz und persönlichen*

Losgelöst betrachtet werden muss dagegen das subjektive Empfinden. Der *homo habitus*, der nach Schopenhauer erst durch den Verlust der Dinge von deren Wert belehrt wird, neigt dazu, seine Umgebung als selbstverständlich anzunehmen. Der Verlust einer Funktion belastet ihn dann. Je selbstverständlicher die Umgebung angenommen wird, desto verletzlicher ist er gegenüber der Änderung (Verletzlichkeitsparadoxon).

Die Kritikalität ist weder die Exponiertheit noch die Anfälligkeit und auch sind es nicht jene Faktoren, die interne Stärken der untersuchten Objekte beschreiben. Kritikalität entsteht aus dem Zusammenwirken dieser Komponenten. Sie ist etwas darüber Hinausgehendes.¹⁵⁹

3.2.2 Kritikalität (-analysen) und deren Anwendungsbereiche

Die Bewertung verschiedener Prozesse hinsichtlich ihrer Kritikalität kann auf verschiedene Arten erfolgen. Die Kritikalitätsanalyse ist dabei ein Analyseinstrument, welches Aussagen zum Verhalten des untersuchten Objektes anstellt. Im Fokus steht dabei das Verhalten im Falle eines Fehlers. Bei einer Fehlfunktion ist die Funktion des Objektes nicht nur eingeschränkt oder ausgeschlossen. Vielmehr wechselt das System bzw. Objekt in einen unkontrollierten Zustand. Die genauen Folgen eines Ausfalls geistig vorwegzunehmen, heißt auf den unkontrollierten Zustand in allen möglichen Facetten reagieren zu können. Entscheidende Parameter in der Ausfallbetrachtung können der Schweregrad der Folgen (wichtig im Bereich möglicher Personenschäden) sowie die Häufigkeit des Ausfallereignisses (wichtig im Bereich der finanziellen Planung von Betrieb und Erhalt) sein. Im Folgenden sollen vor allem die Gebiete der IT- und Anlagentechnik beschrieben werden, bevor auf die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse und darauf aufbauend auf die Kritikalitätsbeurteilungsmethode eingegangen werden soll.

3.2.2.1 Kritikalität in der Kernphysik

In der Kerntechnik beschreibt der Begriff Kritikalität eine Eigenschaft der Neutronenbilanz. Bei einer Kernspaltung können freiwerdende Neutronen ihrerseits wiederum von spaltbaren Kernen absorbiert werden, was zu deren Spaltung führt. Kommt es zu einer Kettenreaktion, spricht man von einem multiplizierenden Medium. Wenn sich diese Kettenreaktion dann selbst erhält,

Infrastrukturen in: Krisenmanagement – Notfallplanung – Bevölkerungsschutz: Festschrift anlässlich 60 Jahre Ausbildung im Bevölkerungsschutz, dargebracht von Partnern, Freunden und Mitarbeitern des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, hrsg. v. Christoph Unger, Thomas Mitschke und Dirk Freudenberg (Berlin: Duncker & Humblot, 2013), S. 331.

¹⁵⁹ Vgl. Autorenmanuskript zu Fekete, Alexander: *Schlüsselbegriffe im Bevölkerungsschutz zur Untersuchung der Bedeutsamkeit von Infrastrukturen: von Gefährdung und Kritikalität zu Resilienz und persönlichen Infrastrukturen in: Krisenmanagement – Notfallplanung – Bevölkerungsschutz: Festschrift anlässlich 60 Jahre Ausbildung im Bevölkerungsschutz, dargebracht von Partnern, Freunden und Mitarbeitern des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe*, hrsg. v. Christoph Unger, Thomas Mitschke und Dirk Freudenberg (Berlin: Duncker & Humblot, 2013).

unterliegt das System dem Zustand der Kritikalität, es ist kritisch.¹⁶⁰ Diese Kritikalität ist beim Transport nuklearen Materials unbedingt zu vermeiden, beim Betrieb von Kernreaktoren zu kontrollieren.¹⁶¹ Die Folgen bei einem Fehler dieses Prozesses (Kritikalitätsunfall) können auslegungsüberschreitende Störfälle bis zur höchsten Stufe (7) der Internationalen Bewertungsskala für nukleare und radiologische Ereignisse (INES) sein.

3.2.2.2 Kritikalität im IT-(Krisen-)management

Auch im Bereich der IT wird unter Kritikalität die Ausfallschwere verstanden. Dabei werden Kritikalitäten bspw. in ihren Verfügbarkeiten dargestellt. Es werden n Stufen unterschieden, wobei die Stufe n jene Zeitdauer widerspiegelt, welche der schadensintensivste Prozess benötigt, um ein existenzbedrohendes Ausmaß anzunehmen.¹⁶² Umgekehrt wird die erste Stufe per definitionem nicht existenzbedrohend sein.¹⁶³

In der Kritikalitätsanalyse werden Prozesse und Systeme unterschieden. Die Prozesskritikalitäten verlangen von den Fachbereichen die Identifikation ihrer kritischen Geschäftsprozesse, welche diese dann in Abhängigkeit von ihren Kritikalitäten bewerten.¹⁶⁴ Darauf aufbauend werden dann jene Systemkritikalitäten abgeleitet, die direkt von den Systemen innerhalb des Geschäftsprozesses verwendet werden.¹⁶⁵

Bei dieser zweistufigen Kritikalitätsanalyse werden folglich zwei Analysen hintereinandergeschaltet. Zuerst auf der (hierarchisch übergeordneten) Prozessebene, dann auf der folgenden Systemebene. Von besonderer Bedeutung ist hier die Tatsache, dass gleiche Systeme in unterschiedlichen Prozessen unterschiedliche Kritikalitäten aufweisen können.¹⁶⁶

Ein weiteres Beispiel für Software-Kritikalitätsanalysen findet sich im Bereich der Raumfahrt. Die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) fordert von Zulieferern eine Software-Kritikalitätsanalyse, wenn diese missions- oder sicherheitskritisch ist. Dabei wird die Kritikalität jedes möglichen

¹⁶⁰ Vgl. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit: *Handbuch zur Kritikalität - Kritikalität und nukleare Sicherheit*, Überarb. Aufl., GRS 379 (Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2015), S. 1.

¹⁶¹ Vgl. Schweer, H.-H.: *Die Kritikalitätssicherheit beim Transport von Kernbrennstoffen* (Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1982), S. 5.

¹⁶² Vgl. Seibold, Holger: *IT-Risikomanagement*, 1. Aufl. (München: Oldenbourg-Verlag, 2006). doi:10.1524/9783486840346, S. 231.

¹⁶³ Vgl. Seibold, Holger: *IT-Risikomanagement*, 1. Aufl. (München: Oldenbourg-Verlag, 2006). doi:10.1524/9783486840346, S. 231.

¹⁶⁴ Vgl. Seibold, Holger: *IT-Risikomanagement*, 1. Aufl. (München: Oldenbourg-Verlag, 2006). doi:10.1524/9783486840346, S. 232.

¹⁶⁵ Vgl. Seibold, Holger: *IT-Risikomanagement*, 1. Aufl. (München: Oldenbourg-Verlag, 2006). doi:10.1524/9783486840346, S. 234.

¹⁶⁶ Vgl. Seibold, Holger: *IT-Risikomanagement*, 1. Aufl. (München: Oldenbourg-Verlag, 2006). doi:10.1524/9783486840346, S. 234.

Programmfehlers für das Gesamtsystem bestimmt.¹⁶⁷ Vergleicht man zwei Software-Images, die Boot-Software und die operative Software, so können Parallelen zur o.g. zweistufigen Kritikalitätsanalyse gezogen werden. Die beiden Images funktionieren in Reihe geschaltet. Nach dem Ausführen der Boot-Software initialisiert diese die Hardware und lädt dann entweder die operative Software oder updatet diese. Die Kritikalität der operativen Software ist gering. Kann sie nicht gestartet werden, wird ein Update ausgeführt, welches als Ersatz bzw. Reparatur dient. Die Boot-Software ist dagegen von hoher Kritikalität. Kann sie nicht ausgeführt werden, kann die operative Software unter keinen Umständen starten und das Gerät ist nicht funktionsfähig. Das bedeutet, dass der Boot-Software erhöhte Aufmerksamkeit zukommen muss und das Image zudem so einfach wie möglich gehalten werden sollte.¹⁶⁸

Im Bereich der Software gilt dieser Grundgedanke in der Zeit schneller Internetverbindungen umso mehr. Software-Updates können schnell und einfach verteilt und installiert werden. Kann die Hardware jedoch nicht booten, ist ein Update unmöglich. Dies zeigt sich auch in den Größenordnungen der Images. Firmware moderner Desktop-PCs (vgl. BIOS/UEFI) entspricht der Größenordnung von ~ 1 MB. Sie ist notwendig, um einen PC zu starten. Das Betriebssystem, die erste Instanz nach dem Boot-Vorgang, entspricht der Größenordnung mehrerer Tausend MB.

3.2.2.3 Kritikalität in der Luft- und Raumfahrt

Nach DIN EN 16602 sind kritische Punkte potenzielle Bedrohungen für die Leistungsfähigkeit, Qualität, Zuverlässigkeit und Sicherheit eines Systems, die durch einen spezifischen Aktionsplan gesteuert werden, um austretende Risiken zu minimieren und unerwünschte Folgen zu vermeiden.¹⁶⁹

Die „Hardware Software Interaktionsanalyse“ entstammt unter anderem der Raumfahrt. Die Europäische Kooperation für Raumfahrtnormung (European Cooperation for Space Standardization – ECSS) beschreibt die Analyse als eine Aktivität, die durchgeführt wird, um sicherzustellen, dass die Software in akzeptabler Weise auf Hardwareausfälle reagiert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf jeden Ausfallmodus der Hardware gelegt, die in Ausgleichsmaßnahmen (Redundanz, Schutz) eingesetzt und durch Software gesteuert wird.¹⁷⁰ Die HSIA soll dabei parallel zur FMEA/FMECA (siehe Kapitel 3.2.3) durchgeführt werden, um das

¹⁶⁷ Vgl. Grünfelder, Stephan: *Software-Test für Embedded Systems: Ein Praxishandbuch für Entwickler, Tester und technische Projektleiter*, 1. Aufl. (Heidelberg: dpunkt.verlag, 2013), S. 260.

¹⁶⁸ Vgl. Grünfelder, Stephan: *Software-Test für Embedded Systems: Ein Praxishandbuch für Entwickler, Tester und technische Projektleiter*, 1. Aufl. (Heidelberg: dpunkt.verlag, 2013), S. 261.

¹⁶⁹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Raumfahrtproduktsicherung – Kontrolle von kritischen Teilen* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014), S. 9.

¹⁷⁰ Vgl. European Cooperation for Space Standardization: *ECSS-Q-ST-30-02C – Space product assurance: Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)* (Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009), S. 32.

Hardwaredesign und die Softwareanforderungen zu beeinflussen.¹⁷¹ Die HSIA wird dabei verwendet, um zu überprüfen, ob die Softwarespezifikationen die Hardwarefehler gemäß den anwendbaren Anforderungen abdecken.¹⁷² Die HSIA steht der FMEA/FMECA sehr nahe, unter anderem empfiehlt die ECSS für jeden Ausfallmodus die Symptome, die die Softwareaktion auslösen, als Informationen zu verwenden. Diese sind aus der FMEA/FMECA beobachtbar.¹⁷³

Die HSIA als Analyse auf Systemebene stellt fest, ob einem potenziellen Hardwarefehler, so er eine Auswirkung auf die Software haben kann, eine korrespondierende Software-Anforderung zugeordnet ist, die eine Reaktion auf deren Ausfall bereit hält.¹⁷⁴ Hier wird demzufolge eine Korrespondenz zwischen Systemebene und Softwareebene abgehalten. Dementsprechend ist auch eine HSIA eine Analyse, die über zwei Ebenen angewendet wird. Vergleichend mit der Software-Kritikalitätsanalyse lässt sich festhalten, dass die HSIA auf Systemebene als komplementäre Aktivität in Hinblick auf die Softwarekritikalitätsanalyse angesehen werden: Während sich die erste auf Hardwareausfälle und die entsprechenden Softwarereaktionen konzentriert, befasst sich die zweite mit den Auswirkungen softwarebedingter Ausfälle auf das System und damit auf die Hardware.¹⁷⁵ In der HSIA selbst findet sich die Kritikalität dadurch indirekt wieder in der notwendigen FMECA sowie der Software-Kritikalitätsanalyse, als (optionales) Werkzeug.

3.2.2.4 Kritikalität in der teilautomatisierten Fahrzeugführung

Ein Bereich aus dem Gebiet der Autoindustrie, in dem die Bedeutung der Kritikalität eine Rolle spielt, sind die Fahrassistenzsysteme. Hier steht nicht der Produktionsprozess im Vordergrund wie bei der Anlagentechnik, sondern der eigentliche Betrieb des Automobils. Zur fahrzeuggesteuerten Mobilität sind diese nicht zwingend nötig, stattdessen sollen sie, entsprechend der Bezeichnung, assistieren. Diese Assistenten nehmen dem Fahrzeugführer jedoch einiges ab, was die Sicherheit im Straßenverkehr erhöht. Die Erhöhung dieser Sicherheit ist jedoch von der Zuverlässigkeit der Technik abhängig.

¹⁷¹ Vgl. European Cooperation for Space Standardization: *ECSS-Q-ST-30-02C – Space product assurance: Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)* (Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009), S. 32.

¹⁷² Vgl. European Cooperation for Space Standardization: *ECSS-Q-ST-30-02C – Space product assurance: Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)* (Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009), S. 32.

¹⁷³ Vgl. European Cooperation for Space Standardization: *ECSS-Q-ST-30-02C – Space product assurance: Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)* (Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009), S. 32.

¹⁷⁴ Vgl. Grünfelder, Stephan: *Software-Test für Embedded Systems: Ein Praxishandbuch für Entwickler, Tester und technische Projektleiter*, 1. Aufl. (Heidelberg: dpunkt.verlag, 2013), S. 259.

¹⁷⁵ Vgl. European Cooperation for Space Standardization: *ECSS-Q-HB-80-03A DIR1 – Space product assurance: Software dependability and safety* (Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2017), S. 23.

Das Fahrassistenzsystem muss eine Verkehrssituation erfassen und bewerten. Dabei wird, ausgehend vom Fahrassistenzsystem, die Kritikalität für das Egofahrzeug ermittelt. Sicherheitsassistenzsysteme, die das Ziel der Kollisionsvermeidung (oder -minderung) verfolgen, verwenden die Ergebnisse einer Kritikalitätsbewertung als Entscheidungsgrundlage, um ggf. eine Aktion einzuleiten.¹⁷⁶ Neben einer Fahrerwarnung kann dies auch der direkte Eingriff in das Fahrverhalten sein. Der Anspruch an das System (und damit auch an die Kritikalitätsbewertung) ist hoch, da sowohl ein überflüssiges als auch ein ausbleibendes Manöver Gefahr für Mensch und Material darstellt. Zudem ändert sich die Situation aufgrund der (Re-)Aktionen anderer Verkehrsteilnehmer, wodurch die Bewertung als permanenter Prozess verstanden werden muss. Die menschlichen Verkehrsteilnehmer handeln zudem subjektiv, während die Assistenzsysteme die Szenarien objektiv bewerten.¹⁷⁷ Diese zusätzliche Komplexität erhöht auch die Anforderungen an die Assistenz, was wiederum die Kritikalitätsbewertung bedeutender macht.

3.2.3 Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FME(C)A)

In der internationalen Industrie (z.B. der Automobilindustrie) erreichte die *Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse* (FMEA) große Bekanntheit. Sie stellt eine Methode zur Identifizierung von Ausfallmöglichkeiten innerhalb von Betrachtungseinheiten oder Prozessen dar. Sie beschreibt die Ursachen dieser Ausfälle, ihre Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Betrachtungseinheit bzw. des Prozesses und auf die Umgebung. Betrachtungseinheiten können dabei Hardware, Software, menschliche Handlungen und die untereinander wirkenden Einflüsse sein.¹⁷⁸

Die FMEA ist ein flexibles Analysewerkzeug. Sie kann bereits in frühen Phasen von Entwurf und Planung eingesetzt werden. Sie kann iterativ benutzt und über sämtliche hierarchische Ebenen angewendet werden.¹⁷⁹

Wird die FMEA um eine Kritikalitätsanalyse, eine Bewertung der relativen Bedeutung eines speziellen Fehlzustandes, erweitert, spricht man von einer FMECA (*Failure Mode and Effects and Criticality Analysis*). Nach der Norm beinhaltet die Kritikalitätsanalyse eine Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einer Ausfallart und der (darauf bezogenen) Ausfallschwere.¹⁸⁰ Die

¹⁷⁶ Vgl. Tamke, Andreas: *Simulation und Bewertung von Verkehrsszenen für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich*, BV-Forschungsberichte 2013,2 (Aachen: Shaker, 2013), Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013, S. 15.

¹⁷⁷ Vgl. Geyer, Sebastian; Winner, Hermann; Bengler, Klaus: *Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung* (Darmstadt, 2013), Dissertation, S. 111.

¹⁷⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 7.

¹⁷⁹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 7.

¹⁸⁰ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 7.

Kritikalitätsanalyse kann dabei eine quantitative Beurteilung der Ausfallwahrscheinlichkeit und des mit dem Verlust der Funktion verknüpften Grades der Ausfallschwere oder der Schwere der Auswirkung darstellen.¹⁸¹ Dadurch kann eine Priorisierung von Ausfallarten angestellt werden. Die DIN EN 60812 benutzt den Begriff der FMEA als Synonym für eine FMECA.¹⁸² Das Wesen der FMECA begründet sich (gegenüber der FMEA) darin, „die Kritikalität der Ausfallart zu beurteilen, um Prioritäten für Handlungen festzulegen“.¹⁸³

Eine FMEA kann verschiedene Gründe haben. Sie kann die Kosteneffizienz eines Designs verbessern, Risiken gegenüber der Erfüllung der Aufgaben von Einheiten/Prozessen aufdecken, Betriebskosten verringern, Verhalten analysieren, gesetzliche Pflichten zur Nachweiskontrolle erbringen und Grundlagen für andere Analysen liefern.¹⁸⁴

Zur FMEA/FMECA existiert eine Vielzahl an, zum Teil sehr detaillierter, Literatur für die verschiedenen Branchen, in denen die Analyseform Anwendung findet. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird die Kritikalität, wie sie in DIN EN 60812 beschrieben wird, wesentlich mehr Aufmerksamkeit erfahren als die FMEA/FMECA, dennoch sollte der enge Zusammenhang nicht unberücksichtigt bleiben.

3.2.4 Kritikalitätsbeurteilung in DIN EN 60812

Neben den genannten Arten der Kritikalität in den unterschiedlichen Bereichen weist auch die DIN EN 60812 selbst Beschreibungen auf. Dabei geht sie sowohl auf die Eigenschaften der Systeme bzw. Prozesse, die beurteilt werden sollen, als auch auf die Beurteilung selbst ein.

3.2.4.1 Kritikalität(-sbeurteilung) bei komplexen reparierbaren Systemen

Infrastrukturanlagen weisen eine besondere Problematik im Rahmen der zeitlichen Verfügbarkeit auf. So ist die verlangte Verfügbarkeit in der Regel permanenter Natur (vgl. § 3 Bundesfernstraßengesetz (FStrG)). Reziprok bedeutet dies, dass keine Zeit für Nichtverfügbarkeit zur Verfügung steht. Für reparierbare Systeme, zu denen Immobilien jeder Natur im Allgemeinen gehören, lassen sich hinsichtlich Kritikalitätsbeurteilung allgemeine Aussagen treffen. So ist die Nichtverfügbarkeit das Maß zur Bestimmung der Systemkritikalität.

¹⁸¹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 7.

¹⁸² Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 7 f.

¹⁸³ DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 10.

¹⁸⁴ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 10.

Demzufolge entspricht die Nichtverfügbarkeit des Systems der Ausfallwahrscheinlichkeit der Ausfallart.¹⁸⁵

Zur Beschreibung der Zuverlässigkeit kennt die DIN die beiden Zuverlässigkeitsparameter *Mean Time between Failures* (MTBF, dt. etwa *mittlerer Ausfallabstand*) sowie die *Mean Time to Restoration* (MTTR, dt. etwa *mittlere Wiederherstellungszeit*).¹⁸⁶ Beide Zeiten können durch Designmaßnahmen beeinflusst werden, die MTBF z.B. durch Redundanz, die MTBF durch Vereinfachungen der Reparaturmaßnahmen.¹⁸⁷

3.2.4.2 Kritikalitätsbeurteilungsmethoden

Mit der Kritikalitätsmatrix und der Risikoprioritätszahl werden im Folgenden zwei Kritikalitätsbeurteilungsmethoden vorgestellt. Diese beiden Ansätze sind mit der DIN EN 60812 konform und behaupten von sich, die Prinzipien der in der Industrie gebräuchlichen Methoden zusammenfassend abzubilden.¹⁸⁸

3.2.4.2.1 Kritikalitätsmatrix

Bei der Kritikalitätsmatrix handelt es sich um eine Bewertungsmaßnahme, bei der eine Anzahl diskreter Parameter in eine Matrix eingetragen werden, welche sowohl die Wahrscheinlichkeit als auch den Schweregrad eines Ereignisses berücksichtigt. Dabei wird den Elementen der Matrix ein Kritikalitätsgrad zugeordnet.¹⁸⁹ Durch die Zuordnung der Parameter mittels Wahrscheinlichkeit und Schweregrad kann die Kritikalität entsprechend abgelesen werden.

Die beiden Kategorien der Wahrscheinlichkeit und der Auswirkung werden in mehrere Gruppen unterteilt. Die Gruppen haben eine steigende bzw. fallende Tendenz. Je mehr Gruppen gebildet werden, desto detaillierter sind die Zuordnungen möglich, gleichzeitig darf die Detailtiefe die Grenzen des Rationalen nicht überschreiten. Für die Schwere der Auswirkung eines Ereignisses sollten zumindest vier Abstufungen existieren (von maximaler bis minimaler Auswirkung).¹⁹⁰ In Anlehnung an die Norm zeigt die folgende Tabelle vier mögliche Stufen bezüglich der Auswirkungen einmal für Menschen und einmal für die Anlage.

¹⁸⁵ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 47.

¹⁸⁶ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 47.

¹⁸⁷ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 47.

¹⁸⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 40.

¹⁸⁹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 40.

¹⁹⁰ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 40.

Kategorie	1	2	3	4
<u>Bedeutung</u>	Katastrophal	Schwerwiegend	Marginal	Unbedeutend
<u>mögliche personalbezogene Auswirkungen</u>	Ausfall, der zum Tod von Personal führt	Ausfall, der zu einer Einweisung (mit Aufenthalt) ins Krankenhaus führt	Ausfall, der zu Verletzungen führt, die im Krankenhaus behandelt werden müssen	Ausfall, der zu einer Verletzung führt, die nicht mehr als erste Hilfe erfordert
<u>mögliche anlagenbezogene Auswirkungen</u>	Längerfristiger Ausfall der Anlage durch Folgeschäden	Mittelfristiger Ausfall der Anlage	Kurzfristiger Ausfall der Anlage	Eingeschränkte Verfügbarkeit der Anlage

Tabelle 3-1: Exemplarische Abstufungen der Auswirkungen¹⁹¹

Die Abstufungen der Wahrscheinlichkeit eines Ausfallereignisses werden in Wahrscheinlichkeitsbänder unterteilt. Dabei können neben der „klassischen“ Wahrscheinlichkeit auch die Frequenz oder andere Maße verwendet werden. Sowohl die Definition als auch die Anzahl sind abhängig vom Untersuchungsgegenstand. Die Grenzen, welche die Bänder definieren, können nach verschiedenen Aspekten modelliert werden. Zuverlässigkeitsdaten, Expertenurteile, individuelle Grenzen etc. sind möglich. Dabei sollten die Grenzen so gewählt werden, dass sie mit den dazugehörigen Daten kompatibel sind und die gewählte Art muss konsequent eingehalten werden.¹⁹² Ferner ist es wichtig, die Abhängigkeiten von Bezeichnungen der Bänder vor dem Hintergrund des Untersuchungsgegenstandes klar zu definieren. „Häufig“ kann eine Wahrscheinlichkeit von 1/10 sein, aber auch von 1/1.000.000.

Nach den Festlegungen der Schwere- und Wahrscheinlichkeitskategorien werden Kritikalitätskategorien gebildet. Innerhalb einer Matrixstruktur lassen sich diese einfach als Kombination der beiden Attribute bilden. Mit jeder Kritikalitätszahl werden dann Handlungsebenen verknüpft.¹⁹³ Die Handlungen selbst stellen wiederum hohe Anforderungen an die Analyse. In der Regel sind mehrere Parteien in diese Handlungen involviert, die alle von Vorneherein auf diese abgestimmt werden müssen.

Die Norm empfiehlt die Unterteilung der Kritikalität in mindestens 4 Stufen. Selbstverständlich muss auch hier wieder die tatsächlich notwendige Anzahl an Stufen für den untersuchten Sachverhalt ermittelt werden.

¹⁹¹ Nach DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 40.

¹⁹² Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 41.

¹⁹³ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 41.

Zusammenfassend sei die folgende Matrix nach DIN EN 60812 gegeben. Sie stellt die drei Attribute dar als:

- Auswirkung des Ausfallereignisses in 4 Stufen (1 – 4)
- Wahrscheinlichkeit des Ausfallereignisses in 5 Stufen (A – E)
- Kritikalität des Ausfallereignisses in 4 Stufen (X – 3)

Anmerkung: Die numerische Einordnung hat keinerlei Aussage bzgl. der einzelnen Stufen, sie dient lediglich der Unterstreichung der hierarchischen Gliederung.

Auswirkung		Katas-trophal	Schwer-wiegend	Marginal	Unbe-deutend
Wahrscheinlichkeit		1	2	3	4
Häufig	A	X	X	1	2
Wahrscheinlich	B	X	X	1	2
Gelegentlich	C	X	X	1	2
Unwahrscheinlich	D	X	1	1	2
Unbedeutend	E	1	2	2	3

Tabelle 3-2: Beispielhafte Kritikalitätsmatrix¹⁹⁴

3.2.4.2.2 Risikoprioritätszahl

Bei der Risikoprioritätszahl (RPZ) handelt es sich um die Verknüpfung von Bewertungen verschiedener Parameter mittels Multiplikation. In der klassischen, bekanntesten und in der Norm vermerkten Form werden die drei Parameter Schwere (*Severity*), Auftretsfrequenz (*Occurrence*) und Aufdeckungsmöglichkeit (*Detectability*) verwendet. Eine gängige Bezeichnung dieser Form ist die SOD-Methode.¹⁹⁵ Für jede Ausfallart wird eine gesonderte RPZ berechnet. In Abhängigkeit von den Begrenzungen der (ordinalen) Skala ergibt sich die maximal mögliche RPZ (bei der gängigen Einteilung der Parameter in eine Skala von 1 bis 10 ergibt sich die maximale RPZ so bspw. zu $10^3 = 1.000$).

Die Bewertung der drei Parameter erfolgt subjektiv, demzufolge ist auch die RPZ ein subjektiver Wert. Mathematisch sind zudem einige gesonderte Sachverhalte zu berücksichtigen. So ist die RPZ ein Produkt aus drei Werten. Im Wertebereich von 1 bis 1.000 können Produkte aus drei Zahlen im Bereich 1 – 10 nur 120 Werte erzeugen. Die Übrigen 880 bleiben dagegen unberücksichtigt.¹⁹⁶ Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung:

¹⁹⁴ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 42.

¹⁹⁵ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 42.

¹⁹⁶ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 43.

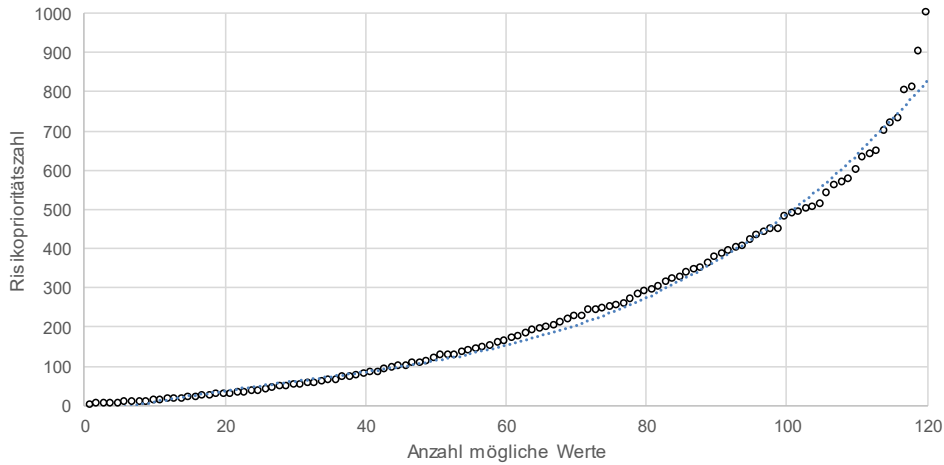


Abbildung 3-3: Verteilung der möglichen Risikoprioritätszahlen (aufsteigend)

Es ist zu erkennen, dass im Bereich der niedrigeren RPZ die Dichte deutlich höher ausfällt als im Bereich der höheren RPZ. Die hohen Werte weisen deutlich größere Abstände zueinander auf als die niedrigeren. Die Verlaufslinie entspricht einem Polynom höherer Ordnung.

Darüber hinaus können gleiche Werte durch unterschiedliche Wertpaare erzeugt werden. So erzeugt die SOD-Kombination 2-4-6 die gleiche RPZ wie die Kombination 6-2-4, obwohl ein Fehler doppelt so oft auftritt. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, dass die RPZ empfindlicher auf Änderungen innerhalb der Parameter reagiert, je höher sie bewertet sind. Das zeigt die folgende Abbildung:

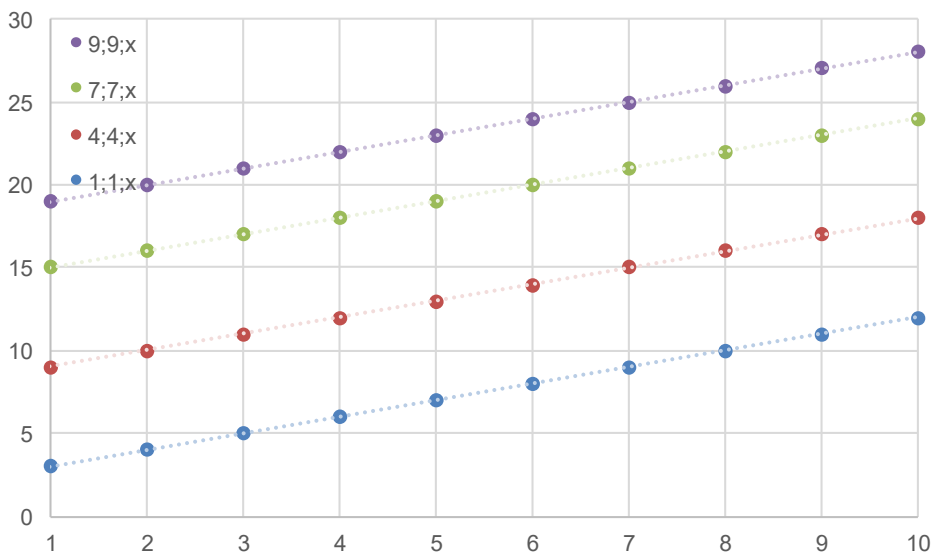


Abbildung 3-4: Verlauf der RPZ bei Änderung eines Parameters in Abhängigkeit von den Verbliebenen

Je höher die beiden durchschnittlichen Parameter, desto stärker fällt der dritte Parameter aufgrund der Multiplikation ins Gewicht. In der Graphik wird das durch die Steigung der

angedeuteten Geraden verdeutlicht. Zudem wird die Inkontinuität deutlich. Die Geraden sind nur angedeutet, tatsächlich existieren die Werte zwischen den Punkten innerhalb der Werte-Tupel nicht.

Die Verwendung von Risikoprioritätszahlen stellt durch diese Sachverhalte hohe Anforderungen an den Sachverstand des Anwenders. Insbesondere bei Ereignissen mit hoher RPZ können Abweichungen oder Unterschiede im subjektiven, bewertenden Meinungsbild zu Abweichungen führen. Aufgrund der Multiplikation sind die Anforderungen für alle drei Parameter, Schwere, Auftretensfrequenz und Aufdeckungsmöglichkeit, gleichsam hoch.

Neben der RPZ existiert auch die SOD als Kennwert. Ungünstigerweise verwendet die DIN für diese ebenfalls die Bezeichnung Risikoprioritätszahl.¹⁹⁷ Es handelt sich hierbei um das Tupel der drei Werte und nicht um eine Multiplikation. Die SOD zeigt dadurch die Risikopriorität in Bezug auf die Parameter (Schwere, Häufigkeit und Aufdeckungsbewertung) selbst.

Über die Aufdeckungswahrscheinlichkeit als Parameter der Kritikalität lässt sich streiten, da Schwere und Häufigkeit Parameter des Systems selbst sind, die Aufdeckungswahrscheinlichkeit dagegen vom Design des Systems, aber auch von der Handhabung durch externe Entitäten abhängig ist. Die Kritikalitätszahl ignoriert dabei die Aufdeckungswahrscheinlichkeit. Sie entspricht der Multiplikation der Schwere und Häufigkeit und dient dazu, eine Klassifizierung für potenzielle Ausfallarten zu ermöglichen.¹⁹⁸

3.2.5 Kritikalität in der Infrastruktur(-forschung)

Anders als in den bisher aufgezeigten Bereichen, ist der Begriff der Kritikalität in der Infrastrukturforschung größtenteils jüngeren Datums. So datieren die meisten Quelle nicht nur auf die Zeit nach der Jahrtausendwende, sondern überwiegend auf die letzten Jahre. Politisch motiviert, gerade auch durch den Begriff der „kritischen Infrastrukturen“, wird auch die „Kritikalität“ immer häufiger verwendet.

Als problematisch stellt sich jedoch jener Sachverhalt dar, dass der Begriff der Kritikalität in der Infrastrukturforschung, ebenso wie der der kritischen Infrastrukturen, inflationär und undefiniert verwendet wird. So lassen sich viele Quellen finden, in denen Formulierung und Definitionen nicht logisch konzipiert sind.¹⁹⁹ So werden kritische Infrastrukturen teilweise als Systeme beschrieben,

¹⁹⁷ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 68.

¹⁹⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015), S. 68.

¹⁹⁹ Vgl. Engels, Jens I.: *Relevante Beziehungen. Vom Nutzen des Kritikalitätskonzepts für Geisteswissenschaftler in: Was heißt Kritikalität?*, hrsg. v. Alfred Nordmann (Transcript Verlag), S. 8.

welche kritisch sind.²⁰⁰ Das resultierende Hysteron-Proteron hat wissenschaftlich jedoch keinen Wert.

Eindeutig definiert das Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe Kritikalität als „relatives Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat“.²⁰¹ Damit definiert das Bundesamt Kritikalität jedoch als Eigenschaft, die explizit für Infrastruktur gilt und nicht in anderen Bereichen existiere. Das führt zu einem Problem der Inkommensurabilität des Begriffs gegenüber diesen Bereichen. Auch wenn die Bestimmung des Wortes ähnlich ist, ist die Definition nicht gleich, da jede wissenschaftliche Disziplin ihre eigene, andere Definition aufrecht erhält.²⁰²

Eine andere Verwendung innerhalb der Infrastrukturforschung erhält der Begriff innerhalb der ökologischen Infrastrukturbetrachtung. Hier bedeutet Kritikalität ein hohes Maß an Abhängigkeit von Ressourcen. So ist die Abhängigkeit der Telekommunikationsinfrastruktur gegenüber der Energieinfrastruktur sehr hoch. Für die Telekommunikationsinfrastruktur gilt daher eine hohe Kritikalität.²⁰³ Auch diese Definition scheint nicht vollkommen, da aus dem gleichen Grund die Energieinfrastruktur eine mindestens genauso hohe Kritikalität aufweisen müsste.

Aufgrund der politischen Prägung, dem populärwissenschaftlichen Aufgreifen und der gesellschaftlichen Polarisierung des Begriffes, scheint der thematisch naheliegende Bereich dennoch der Ungeeignetste zu sein, um eine Definition des Begriffs für den Kontext der Arbeit zu liefern. Stattdessen scheinen die systemtheoretischen und anlagentechnischen Definitionen viel geeigneter zu sein.

3.2.6 Vernetzungsanalyse (Cross-Impact-Analyse)

Eine weitere Methode zur Beschreibung der Kritikalität findet sich in der Vernetzungsanalyse. Dabei werden die einzelnen Variablen eines Systems mitsamt ihrer Vernetzung innerhalb des Systems untersucht. Es handelt sich hierbei um eine Disziplin der Systemtheorie bzw. Kybernetik. Sie ermöglicht es, Elemente (oder auch Elementgruppen bzw. Teilsysteme) in eine Beziehung zueinander zu setzen. Dadurch lassen sich praktisch beliebig komplexe Systeme abbilden und

²⁰⁰ Vgl. Abstract zu Egan, Matthew J.: *Anticipating Future Vulnerability: Defining Characteristics of Increasingly Critical Infrastructure-like Systems* in: *Journal of Contingencies and Crisis Management* (2007).

²⁰¹ Susanne Lenz: *Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen*, Forschung im Bevölkerungsschutz 1 (Bonn, 2009), S. 19.

²⁰² Vgl. Engels, Jens I.: *Relevante Beziehungen. Vom Nutzen des Kritikalitätskonzepts für Geisteswissenschaftler in: Was heißt Kritikalität?*, hrsg. v. Alfred Nordmann (Transcript Verlag), S. 25.

²⁰³ Vgl. Hoffmann, Esther: *Kritische Infrastruktur im Klimawandel* (Berlin, 15.11.2012).

analysieren. Komplexe Systeme sind, im Gegensatz zu komplizierten Systemen, nur bedingt vorhersehbar. Sie erfordern einen Ansatz ganzheitlicher Betrachtung.²⁰⁴

3.2.6.1 Grundlagen der Systemtheorie und Kybernetik

Kybernetik, vom griechischen *kybernetes* (Steuermann), bezeichnet die Steuerung, aber auch die Erkennung und Regelung von Abläufen, die vernetzt ineinandergreifen mit einem Energieaufwand, der minimal sein soll.²⁰⁵ Bereits nach dem Begründer des Begriffes, dem Mathematiker Norbert Wiener, entstammt die Kybernetik dem Bereich des Lebendigen und eindeutig nicht dem Bereich der Informationstechnologie. So unterliegt jede funktionierende biologische Instanz der Kybernetik. Die Kybernetik als „Steuermann“, der selbst Bestandteil des Systems ist, steuert die effiziente Selbstregulation. Die beidseitige Beziehung zwischen Umwelt und Individuum als ständiges Wechselspiel ist eine Grundlage der Evolution.²⁰⁶ Die Organisation solcherart zu führen, dass sich die Abläufe des betrachteten Systems, egal welcher Größe, automatisch (und dazu effizient), im Gang halten, ist die zentrale Aufgabe eines dynamischen Regelkreises. Dieser hält einen ganzen Organismus aufrecht, „von der einzelnen Mikrobe über den Menschen und einen Teil der von ihm geschaffenen künstlichen Systeme bis hinauf zur Biosphäre als Ganzes.“²⁰⁷

Mit dem Verständnis des Regelkreises geht auch die Tatsache der Komplexität einher. Ein Regelkreis besteht neben der zu regelnden Größe, der sogenannten Regelgröße, aus einem Regler, der die Regelgröße verändern kann. Der Regler misst mittels eines Messinstrumentes den Zustand der Regelgröße. Im Falle einer Abweichung des Ist- zum Soll-Zustand veranlasst der Regler durch Zu- oder Abfuhr der benötigten Messgröße die Einhaltung des Soll-Zustands.²⁰⁸ Der Regelkreis kann jedoch im Allgemeinen nicht isoliert betrachtet werden. Durch die Interaktion eines Regelkreises mit anderen entsteht ein komplexes, vernetztes Gefüge. Zusätzlich zum Einzelsystem muss dementsprechend untersucht werden, welche Auswirkungen die einzelnen Systeme aufeinander sowie auf das Gesamtsystem haben.²⁰⁹

²⁰⁴ Vgl. Thommen, Jean-Paul: *Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*, 8., überarb. und erw. Aufl. (Zürich: Versus, 2008), S. 40.

²⁰⁵ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 154.

²⁰⁶ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 154.

²⁰⁷ Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 155.

²⁰⁸ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 43.

²⁰⁹ Nach Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 156.

Die Komplexität, als Bandbreite von Wechselwirkungen, erfordert eine vernetzte Betrachtungsweise. Das bedeutet, dass die Wechselwirkung der einzelnen betrachteten Systeme aufeinander in den Vordergrund tritt, während die individuelle Betrachtung der einzelnen Komponenten in den Hintergrund tritt.

Verändern sich Wirkung und Ursache in gleichem Maße, so ist die Beziehung unter ihnen linear. Das stellt jedoch nur den Sonderfall dar. Die Regel stellen nicht lineare Beziehungen dar, bei denen die Wirkung zur Ursache in einem potenzierten oder exponentiellen Verhältnis steht.²¹⁰ Durch entsprechend starke Wechselwirkungen der (Teil-)Systeme untereinander verschmelzen Ursachen und Wirkungen, da die (Teil-)Systeme untereinander auf sich selbst einwirken. Durch Verstärkungen entstehen Rückkopplungen. Verstärken sich Wirkung und Rückwirkung, so ist die Rückkopplung positiv. Dieses „Aufschaukeln“ bzw. „Abschaukeln“ ist notwendig, um innerhalb von Gleichgewichtszuständen wechseln zu können.²¹¹ Umgekehrt ist eine Rückkopplung negativ, wenn sich Wirkung und Rückwirkung entgegengerichtet verhalten. Die negative Rückkopplung hält das System im Gleichgewicht. Ein System muss zwangsweise eine solche aufweisen, da es sonst nicht kontrollierbar wäre.²¹²

3.2.6.2 Vernetzungsanalyse nach Vester

Basierend auf den Grundlagen der Kybernetik stellt die Vernetzungsanalyse nach Frederic Vester ein Analysewerkzeug dar, welches die Zusammenhänge (engl. cross impact) zwischen den einzelnen Teilsystemen untersucht.

Dabei untersucht die Vernetzungsanalyse verschiedene Variablen, aus denen die Wechselwirkungen ermittelt werden. Dieser systemrelevante Variablensatz entsteht durch die Datenreduktion auf die relevanten Schlüsselkomponenten. Variablen können sowohl objektive Fakten wie auch Erfahrungswerte widerspiegeln, sowohl qualitativer als auch quantitativer Natur sein.²¹³ An das Finden des Variablensatzes sind hohe Erwartungen geknüpft, da die Qualität der Analyse letzten Endes von der Qualität der Variablen abhängig ist. So wie es auf der einen Seite wünschenswert ist, keine Systemkriterien zu vergessen, ist auf der anderen Seite eine

²¹⁰ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg., Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 41.

²¹¹ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg., Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 155.

²¹² Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg., Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 156.

²¹³ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg., Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 213.

Beschränkung der Variablen auf eine „überschaubare Anzahl unumgänglich“. ²¹⁴ Daher ist eine Überprüfung des Variablensatzes, ob er die notwendigen Systemkriterien beinhaltet, notwendig, insbesondere um eine einseitige Betrachtungsweise auszuschließen. ²¹⁵ Dazu wird der Variablensatz iterativ überarbeitet, bis sämtliche Aspekte und Kriterien, die zur Abbildung im Modell notwendig sind, ausgewogen wiedergegeben werden. Dabei kann eine Matrix (Kriterienmatrix) hilfreich sein, um die Abhängigkeiten zwischen den Variablen und den einzelnen Kriterien aufzuzeigen.

Kriterien	LEBENSBEREICHE						PHYS. KATEG.			DYN. KATEGORIE				SYSTEMBEZIEHG.				
	Wirtschaft	Population	Flächennutzung	Humanökologie	Naturhaushalt	Infrastruktur	Gemeinwesen	Materie	Energie	Information	Flußgröße	Strukturgröße	Zeitliche Dynamik	Räumliche Dynamik	Öffent System d. Input	Öffent System d. Output	Von Innen beeinflussbar	Von Außen beeinflussbar
1 Lebensqualität	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2 Wirtschaftskraft des Ortes	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3 Öffentlicher Nahverkehr	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4 Image des Ortes	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5 Freizeitangebot	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6 Einwohnerzahl	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
7 Autogerechte Verkehrswege	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
8 Intakte Umwelt	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
9 Arbeitsplätze	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
10 Gäste und Besucher	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11 Kulturangebot	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
12 Verkehrsbelastung	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
13 Kurangebot	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
14 Zukunftsorientierte Gemeindepolitik	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
15 Finanzmittel der Stadt	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
16 Intakte Landwirtschaft	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
17 Ausreichende Infrastruktur	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
18 Neue Mobilität	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Summe:	5,5	4	7,5	7,5	5,0	9,5	4,5	15,0	6,5	11,0	8,5	13,0	11,0	8,5	9,0	11,0	16,0	9,0

Abbildung 3-5: Beispiel einer Kriterienmatrix²¹⁶

In der eigentlichen Modellbildung wird anschließend die Wirkung der Variablen im Systemzusammenhang analysiert. Die ermittelten Variablen werden dazu in einer Matrixform notiert. Die Variablen werden in der Matrix sowohl von oben nach unten in einer Spalte als auch in der gleichen Reihenfolge von links nach rechts in einer Zeile angetragen. Der erste Schritt zur kybernetischen Beschreibung ihrer Rolle besteht nun in der Abschätzung der Einflüsse jeder Variablen auf jede andere. ²¹⁷ Dazu wird die Matrix zu einer Einflussmatrix erweitert, welche die Beeinflussung bzw. Beeinflussbarkeit der einzelnen Variablen aufzeigt. Zur Beschreibung der

²¹⁴ Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 218.

²¹⁵ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 218.

²¹⁶ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 223.

²¹⁷ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 226.

Einflüsse eignen sich bspw. Skalen mit den Zahlen 0 bis 3, wobei 0 keinen Einfluss und 3 einen sehr starken Einfluss widerspiegelt.²¹⁸

Anschließend wird die Einflussmatrix in die Konsensmatrix überführt. Die weist die bewerteten Stärken der einzelnen Variablen auf.

Wirkung von auf →																Aktivsumme P	
	Attraktivität für Erholung	Bedürfnis nach Freizeitsstätten	Frequenzierung der Freiflächen	Vielfalt der Pflanzenarten	Faunendiversität	Strukturvielfalt der Landschaft	Flächenanteil der Kleingärten	Zerschneidung durch Wege	Intensivlandwirtschaft	Luftqualität	Kaltluftbildungen/Abfluss	Abfallmengen	Lebensmittelqualität	Abwassermengen	Grundwasserqualität		
Attraktivität für Erholung	X	1	3	0	0	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	16	672
Bedürfnis nach Freizeitsstätten	2	X	1	2	2	2	3	1	0	0	1	0	0	0	0	24	240
Frequenzierung der Freiflächen	2	3	X	3	3	2	2	1	0	0	0	2	0	1	1	35	1295
Vielfalt der Pflanzenarten	3	0	0	X	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	20	540
Faunendiversität	2	0	1	0	X	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	15	570
Strukturvielfalt der Landschaft	3	0	1	3	3	X	0	0	1	0	2	0	0	0	1	25	650
Flächenanteil der Kleingärten	2	1	3	2	2	2	X	0	0	0	1	1	1	1	2	32	416
Zerschneidung durch Wege	3	0	2	0	3	1	1	X	0	0	1	0	0	0	0	17	119
Intensivlandwirtschaft	3	0	2	3	3	3	0	0	X	2	1	1	3	1	3	44	484
Luftqualität	2	0	1	1	1	0	0	0	0	X	1	0	2	0	0	18	234
Kaltluftbildungen/Abfluss	0	0	1	0	0	0	0	0	2	3	X	0	0	0	0	15	135
Abfallmengen	3	0	1	1	1	1	0	0	0	1	0	X	0	2	1	24	264
Lebensmittelqualität	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	X	0	0	5	105
Abwassermengen	2	0	1	1	2	0	0	0	0	1	0	0	1	X	2	25	350
Grundwasserqualität	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	X	9	207
Passivsumme	42	10	37	27	38	26	13	7	11	13	9	11	21	14	23		
Qx100	38	240	95	74	39	96	246	243	400	138	167	218	24	179	39		

Abbildung 3-6: Beispiel einer Konsensmatrix²¹⁹

Eine dieser Einflussstärken ist die Aktivsumme AS. Sie berechnet sich als Summe der horizontalen Werte der Matrix.

$$AS_i = \sum_j E_{i,j}$$

Formel 3-4: Aktivsumme²²⁰

Besitzt eine Variable eine hohe Aktivsumme (AS), dann haben bereits geringe Veränderungen dieser Variable einen großen Einfluss auf das System.

²¹⁸ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 227.

²¹⁹ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 228.

²²⁰ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 227.

Eine andere Einflussstärke ist die Passivsumme. Sie ermittelt sich durch die spaltenweise Addition der Werte der Matrix.

$$PS_j = \sum_i E_{i,j}$$

Formel 3-5: Passivsumme²²¹

Die Passivsumme sagt aus, in welchem Maß die Variable auf Veränderungen des Systems reagiert. Bei einer hohen Passivsumme (PS) beeinflusst eine Änderung im System diese Variable mit hoher Wahrscheinlichkeit sehr deutlich.

Zwei zentrale Fragen lassen sich mithilfe der Aktiv- und Passivsummen jedoch nicht beantworten. Jene nach geeigneten Steuerungshebeln und jene nach Komponenten, die das System gefährden. Der zentrale Grund liegt hierbei in der fehlenden Abhängigkeit der beiden Parameter. Aus diesem Grund ist der Quotient aus Aktiv- und Passivsumme notwendig, der bspw. einer stark aktiven Variablen dennoch einen geringen Wert zuordnet, wenn diese gleichzeitig auch stark passiv ist.

$$Q_j = AS_i/PS_j$$

Formel 3-6: Quotient Q²²²

Die Frage, wie stark eine Variable am Gesamtsystem anhängt, lässt sich durch Multiplikation der Aktiv- und Passivsumme ermitteln. Je größer das Produkt ist, desto kritischer ist die Variable. Die Kritikalität ist demzufolge das Maß der Relevanz der Variable für das System, unabhängig von der Aktivität bzw. Passivität.²²³

$$P_j = AS_i * PS_j$$

Formel 3-7: Produkt P²²⁴

²²¹ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 227.

²²² Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 230.

²²³ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 8–14.

²²⁴ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 230.

Die einzelnen Rollen bzw. deren Verteilung lässt sich mithilfe einer zweidimensionalen Graphik darstellen. Dazu werden in einem Koordinatensystem die Passivsummen der einzelnen Variablen auf der Abszissenachse und die Aktivsummen auf der Ordinatenachse abgebildet. Mithilfe einiger Überlegungen lassen sich Bereiche bilden und verschiedenen Eigenschaften zuordnen.

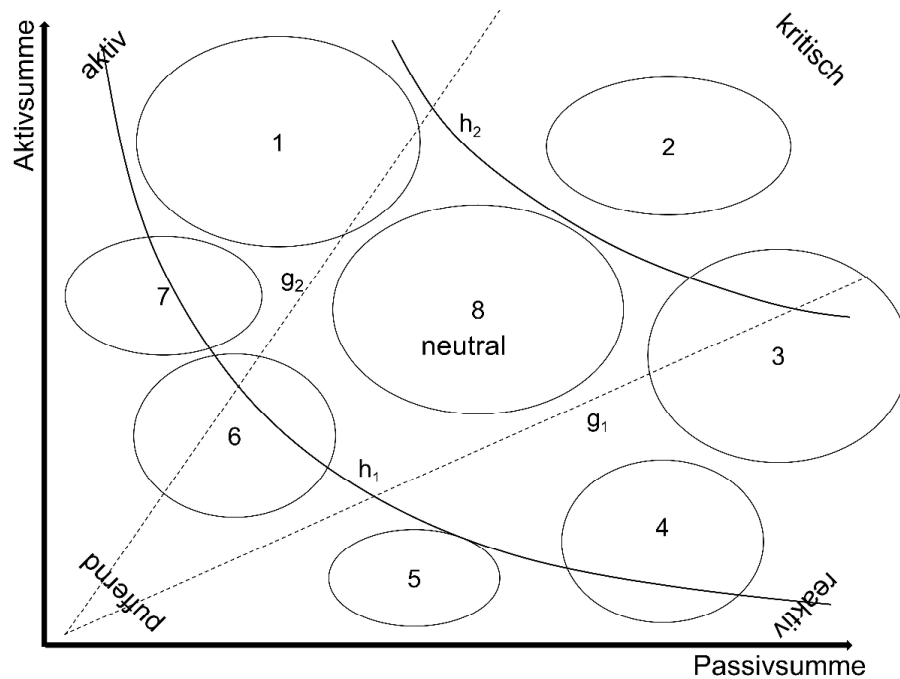


Abbildung 3-7: Interpretation der Rollenverteilung²²⁵

So können Linien mit konstanten Quotientenindizes definiert werden. Hierbei handelt es sich um Geraden durch den Ursprung. Mit ihnen lässt sich der betrachtete Quadrant bspw. dritteln. Dazu werden zwei Geraden gebildet mit den folgenden Formeln:

$$Q_1 = \tan(30^\circ) \text{ bzw. } Q_2 = \tan(60^\circ)$$

Formel 3-8: Bildung der Quotientendrittung²²⁶

Analog dazu können Linien mit konstanten Produktindizes bestimmt werden. Dabei handelt es sich um Hyperbeln. Auch hier kann eine Drittelung vorgenommen werden. Die gesuchten Hyperbeln ergeben sich dann zu

²²⁵ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg., Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 235.

²²⁶ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 8–10.

$$h_1(PS) = \frac{1^2 P_{max}}{3^2 PS} \text{ bzw. } h_2(PS) = \frac{2^2 P_{max}}{3^2 PS}$$

Formel 3-9: Bildung der Produktendrittelung²²⁷

Entsprechend der Nummerierung der Abbildung lassen sich die Bereiche wie folgt beschreiben:²²⁸

1. Effektive Schalthebel zur Stabilisierung
2. Beschleuniger & Katalysatoren zur Initialzündung
3. Riskante Variablen
4. Starke Indikatoren, zur Korrektur ungeeignet
5. Träge Indikatoren, zur Korrektur bedingt geeignet
6. Schwach bis gar nicht wirksame Variablen, dienen der Kontrolle
7. Schwache Hebel mit wenigen sekundären Effekten
8. Neutralbereich, schwach in Bezug auf die externe Steuerung, jedoch gute Eignung zur Selbstregulation

Die komplexen Strukturen des betrachteten Gesamtsystems können mithilfe dieser linearen Betrachtungsweise nur bedingt abgebildet werden, da lediglich die direkten Beziehungen der Variablen untereinander Berücksichtigung finden. Für eine Betrachtung der indirekten Einflüsse bedarf es einer Analyse höherer Ordnung. Die lineare Vernetzungsanalyse kann lediglich als Ausgangspunkt für diese verstanden werden.

Denn dieser lineare Ansatz berücksichtigt weder die mögliche Wiederholung von Interaktionen in einem System im Kontext seiner zeitlichen Entwicklung noch sein konvergentes oder divergentes Verhalten. Längere (evtl. gewichtete) Pfade durch das Netzwerk führen auch zu geschlossenen Pfaden und (Rückkopplungs-)Schleifen und dominieren das (Langzeit-)Verhalten. Der lineare Ansatz lässt sich jedoch leicht auf die Behandlung von Mehrfachinteraktionen erweitern, durch mehrmaliges Anwenden der Adjazenzmatrix auf das System. Das bedeutet, dass das Quadrat von A die Anzahl der Pfade mit der Länge 2 von der Quelle zum Zielknoten zurückgibt.²²⁹ Ganz allgemein gilt:

²²⁷ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 8–11.

²²⁸ Vgl. Vester, Frederic: *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*, Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg, Dtv 33077 (München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002), S. 235.

²²⁹ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 8–13.

$$A_{i,j}^k = (AA^{k-1})_{i,j} = \sum_r A_{i,r} A_{r,j}^{k-1}$$

Formel 3-10: Berechnung einer Adjazenzmatrix höherer Ordnung²³⁰

Mithilfe der Formel lassen sich folgende Aussagen erhalten:

- $A_{i,j}^k$, als die Anzahl der Pfade mit der Länge k von Knoten i nach Knoten j²³¹
- $\sum_{k=1}^m A_{i,j}^k$, als Anzahl der Pfade mit der Länge $\leq m$ von Knoten i bis Knoten j²³²
- $\sum_{k=1}^m A_{i,i}^k$, als Anzahl der geschlossenen Schleifen mit der Länge $\leq m$, an denen der Knoten i beteiligt ist²³³

Aktiv- und Passivsummen der höheren Ordnung beinhalten auch das Systemverhalten im Zeitverlauf. Das Vorgehen wird mehrfach auf die Adjazenzmatrix (die in diesem Fall der Konsensmatrix entspricht) angewendet, bis im System ein stabiler Zustand erreicht wird. Dadurch kann das tatsächliche Langzeitverhalten in Bezug auf die Rolle einer Variablen durch höhere Potenzen der Matrix A bestimmt werden.²³⁴

3.3 Begriffe der Instandhaltung

Unter Instandhaltung versteht die DIN 13306 wie auch die DIN 31051 die Summe sämtlicher Maßnahmen während der tatsächlichen Lebensdauer einer Einheit, die dafür Sorge tragen, dass die Einheit ihre Funktion erfüllen kann.²³⁵ Das kann sowohl die Gewährleistung als auch eine Rückführung in den entsprechenden Zustand sein. Instandhaltung, wie sie im Folgenden behandelt wird, bezieht sich in dieser Form vor allem auf Bauelemente, Geräte und Betriebsmittel,

²³⁰ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 8–13.

²³¹ Vgl. Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang: *Mathematical Background of Key Performance Indicators for Organizational Structures in Construction and Real Estate Management* *Procedia Engineering* 85 (2014), doi:10.1016/j.proeng.2014.10.585, S. 575.

²³² Vgl. Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang: *Mathematical Background of Key Performance Indicators for Organizational Structures in Construction and Real Estate Management* *Procedia Engineering* 85 (2014), doi:10.1016/j.proeng.2014.10.585, S. 575.

²³³ Vgl. Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang: *Mathematical Background of Key Performance Indicators for Organizational Structures in Construction and Real Estate Management* *Procedia Engineering* 85 (2014), doi:10.1016/j.proeng.2014.10.585, S. 575.

²³⁴ Vgl. Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang: *Mathematical Background of Key Performance Indicators for Organizational Structures in Construction and Real Estate Management* *Procedia Engineering* 85 (2014), doi:10.1016/j.proeng.2014.10.585, S. 575.

²³⁵ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), 2.1; bzw. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), 4.1.1.

darüber hinaus auch allgemein auf technische Anlagen. Bereiche, wie die Instandhaltung von Software werden, wie auch innerhalb der einschlägigen Normenliteratur, nicht berücksichtigt.

Im folgenden Kapitel sollen die notwendigen Begriffe zur Instandhaltung, die zum Verständnis der Arbeit notwendig sind, erläutert und, sofern nötig, entsprechend abgegrenzt werden.

3.3.1 Ziele der Instandhaltung

Als Werkzeug zur Instandhaltung steht dem Management die individuelle Strategie zur Verfügung. Da es verschiedene Arten der Instandhaltung gibt, kann die Strategie verschiedene Formen annehmen. Als Verbindung zur Instandhaltung wird daher der Instandhaltungsplan verwendet. Er stellt die strukturierte und dokumentierte Gesamtheit der Aufgaben dar, die zur Durchführung der Instandhaltung aufgebracht werden müssen.²³⁶ Die Tätigkeiten, die aus diesen Aufgaben resultieren, sind jene, welche letztlich die Wertschöpfung der Instandhaltung darstellen und die formulierten Ziele an die Instandhaltung erfüllen.

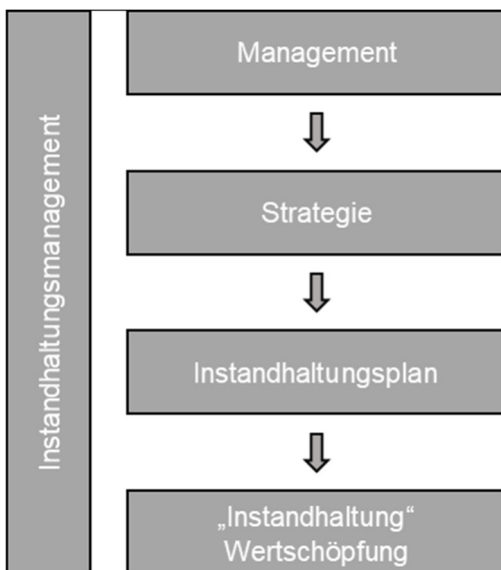


Abbildung 3-8: Organigramm Instandhaltungsmanagement

Das Organigramm zeigt den strukturellen Aufbau und die Beziehung der einzelnen Stellen. So ist das Ziel der Instandhaltung nicht gleich dem Ziel der Produktionsprozesse der Instandhaltung. Vielmehr entspringt das globale Ziel dem gesamten Instandhaltungsmanagement.

Als primäres Ziel der Instandhaltung kann somit, in Konformität mit der DIN 13306, die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit einer Betrachtungseinheit gesehen werden. Darüber hinaus soll die Verfügbarkeit der Einheit im geforderten Zustand gesichert werden. Aus der Verwendung gehen weitere Anforderungen hervor: So muss die Einheit alle Anforderungen, die

²³⁶ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), 2.5.

an sie gestellt wird, erfüllen, unter anderem an ihre Sicherheit, aber auch an die Einflüsse auf die Umwelt.

3.3.2 Lebensdauer von Bauteilen

Die Lebensdauer einer Immobilie ist definiert durch Bau und Abriss. Dabei ist der Lebensdauer wirtschaftlich kaum Bedeutung beizumessen. Der Grund liegt darin, dass die Lebensdauer auch von der Nutzung und dem Gebrauch abhängig ist. Ein Objekt „lebt“ von der Nutzung.

Außerdem wirken diverse Faktoren auf die Lebensdauer. Bereits die Qualität der Planung beeinflusst die spätere Lebensdauer maßgeblich, ebenso wie die Realisierung. Auch die Randbedingungen, welche die Nachfrage unterstützen, sind essentiell, ebenso wie die Disziplin hinsichtlich der Instandhaltung.

3.3.2.1 Gesamtnutzungsdauer

Als Gesamtnutzungsdauer erklärt die ImmoWertV in § 23 „die bei ordnungsgemäßer Bewirtschaftung übliche wirtschaftliche Nutzungsdauer der baulichen Anlagen.“²³⁷ Sie gibt in dieser Form die voraussichtliche Nutzungsdauer an.

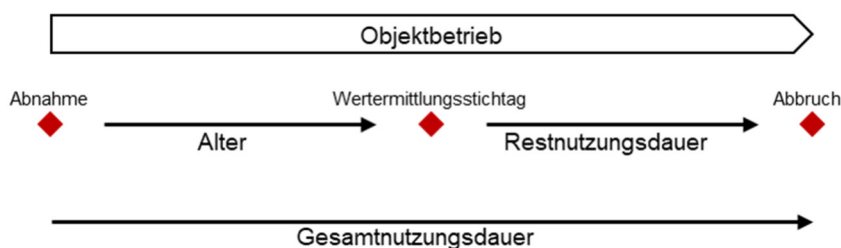


Abbildung 3-9: Zusammenhang zwischen Alter, Rest- und Gesamtnutzungsdauer²³⁸

Die Gesamtnutzungsdauer wird stets durch die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer (und diese durch den Objektbetrieb) gebildet. Die technische Gesamtnutzungsdauer kann nur als Obergrenze der wirtschaftlichen Nutzungsdauer dienen.

3.3.2.2 Technische Gesamtnutzungsdauer

Die technische Gesamtnutzungsdauer wird durch die materielle Abnutzung beschränkt. Wie oben beschrieben, kann die materielle Abnutzung durch Instandsetzungen theoretisch endlos ausgebessert werden, indem Bauteile am Ende ihrer Lebensdauer ausgetauscht werden. Dadurch ist auch die technische Gesamtnutzungsdauer unbegrenzt. Ebenso beschreibt auch die

²³⁷ Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, ImmoWertV, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, § 23.

²³⁸ Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 08/2013), S. 1–23.

Definition des Lehrstuhls für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung diese als endlos: „Würde man alle Bauteile nach ihrer materiellen Abnutzung einfach immer wieder ersetzen, so hätte ein Gebäude theoretisch eine unendliche technische Lebensdauer.“²³⁹

Da in der Instandhaltung von Betrachtungseinheiten ausgegangen wird, muss die technische Gesamtnutzungsdauer auch für jede Betrachtungseinheit einzeln abgefragt werden. Es ist enorm unwahrscheinlich, dass die technische Gesamtnutzungsdauer aller Betrachtungseinheiten zum selben Zeitpunkt endet. Folglich ist ein Ende für die technische Gesamtnutzungsdauer des Objekts als Ganzes ohnehin nur durch Abstriche bei anderen, noch funktionstüchtigen, Betrachtungseinheiten bestimmbar.

3.3.2.3 Wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer

Analog zum Wirken der materiellen Abnutzung auf die technische Gesamtnutzungsdauer wirkt die immaterielle Abnutzung auf die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer. Wenn ein Objekt keine Akzeptanz mehr am Markt und bei potentiellen Nutzern findet, so wird die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer aufgrund der Irreversibilität der immateriellen Abnutzung erreicht. Das Objekt wird nicht mehr rentabel bewirtschaftbar sein. Der Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung definiert, „die wirtschaftliche Nutzungsdauer ist zu Ende, wenn der Reinertrag der baulichen Anlagen absehbar dauerhaft negativ ist.“²⁴⁰ Dabei muss die technische Gesamtnutzungsdauer nicht erreicht sein. Die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer bezieht sich, anders als die technische, auf das gesamte Gebäude oder große Teile davon. Daher muss der Untersuchungshorizont auch darauf erweitert werden. Es ist dem Wesen der Immobilie gegeben, dass jede Einzelne, aufgrund ihres Unikatcharakters, eine individuelle tatsächliche Gesamtnutzungsdauer aufweist.

3.3.2.4 Restnutzungsdauer

Die Restnutzungsdauer lässt sich trivial berechnen zu:

$$\text{Restnutzungsdauer} = \text{Gesamtnutzungsdauer} - \text{Alter}$$

Formel 3-11: Bestimmung der Restnutzungsdauer²⁴¹

Dabei ist als Restnutzungsdauer die Zeit in Jahren zu verstehen, in der die „bauliche Anlage bei ordnungsgemäßer Unterhaltung und Bewirtschaftung voraussichtlich noch wirtschaftlich genutzt

²³⁹ Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 07/2014), S. 1–35.

²⁴⁰ Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 07/2014), S. 1–32.

²⁴¹ Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 07/2014), S. 1–41.

werden kann.“²⁴² Sie berücksichtigt insbesondere Instandsetzungen oder Modernisierungen, da diese die Restnutzungsdauer (und somit auch die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer) positiv beeinflussen sowie unterlassene Instandsetzungen und andere Gegebenheiten, da diese sich negativ auswirken.²⁴³

3.3.3 Beschreibung der Alterung durch Abnutzung

Nachdem ein Gebäude errichtet wurde, bzw. ab dem Zeitpunkt, an dem ein Bauelement der Umgebung ausgesetzt wird, altert es. Biologische, chemische, physikalische und physische Prozesse beeinflussen den Erhalt der Bausubstanz. Sie zehren vom Abnutzungsvorrat (siehe unten) und verschlechtern den Zustand. Damit sinkt auch der Wert des Objekts. Diese Form der Abnutzung ist materieller Natur und die Zeichen dieser Alterseinwirkungen zu beseitigen, und den Zustand wieder anzuheben, ist Aufgabe der Instandhaltung.

Von der materiellen Abnutzung abzugrenzen ist die immaterielle Abnutzung. Hierzu zählen modische, ökologische und wirtschaftliche Verbesserungen, welche auf den immateriellen Zustand abzielen. Im Sinne der Erhaltung der Infrastruktur liegt der Fokus auf der Gewährleistung des Funktionsbetriebs, was sich in der Behebung der materiellen Abnutzung widerspiegelt.

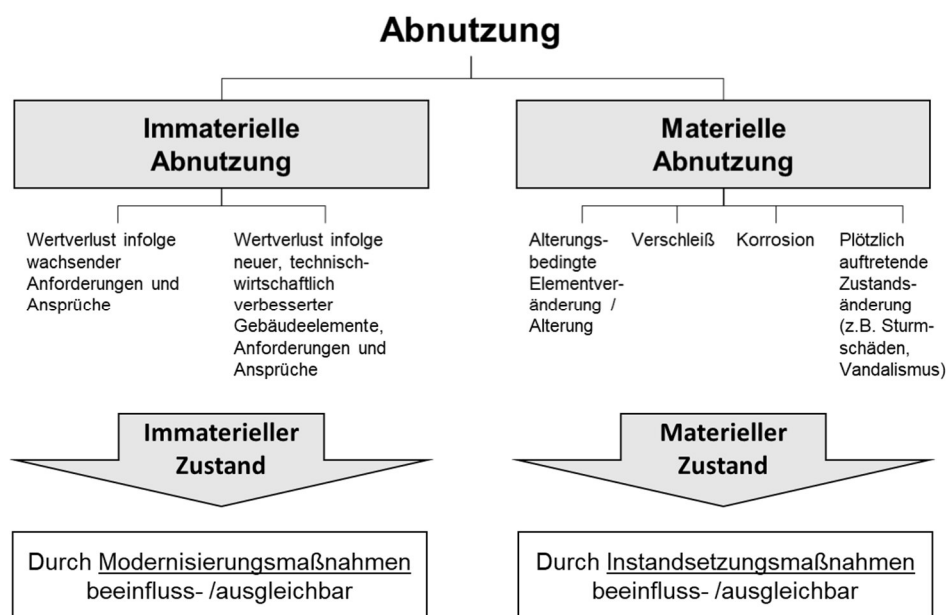


Abbildung 3-10: Arten der Abnutzung^{244 245}

²⁴² Wertermittlungsrichtlinien, WertR, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2006), 3.5.6.2.

²⁴³ Vgl. Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken, ImmoWertV, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, § 23 Abs. 2.

²⁴⁴ Vgl. Zimmermann, Josef: Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 07/2014), S. 1–35.

²⁴⁵ Nach Krug, Klaus-Eberhard: Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung (Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1985), S. 12.

3.3.3.1 Abnutzungsvorrat

Bei der Definition des Abnutzungsvorrates wird davon ausgegangen, dass einer Betrachtungseinheit ein Potential innewohnt. Dieser Vorrat wird zur Erfüllung seiner Funktion verwendet und gewährleistet diese, unter festgelegten Bedingungen bezüglich der beabsichtigten Nutzungsart und Nutzungsintensität. Unterschreitet das Potential einen gewissen Wert, kann die Funktionalität nicht mehr weiter aufrechterhalten werden. Dieses Potential entspricht dem Abnutzungsvorrat.

Als Abnutzungsgrenze wird jener Wert des Abnutzungsvorrates bezeichnet, bei dessen Erreichen eine Handlung von außen notwendig wird. Die Einheit ist dann nicht mehr in der Lage, funktionsgerecht zu arbeiten und muss, spätestens hier, „instandgehalten“ werden.

Entsprechend der DIN muss diese Grenze nicht am Nullpunkt des Abnutzungsvorrates sein. Sie muss vielmehr definiert werden. Dabei kann sie bestimmbar sein, z.B. bei einer Batterie, deren Abnutzungsgrenze erreicht wird, wenn die geforderte Spannung nicht mehr erreicht wird, obwohl sie nicht vollständig entladen ist. Oft ist die Grenze aber durch Vollzug innerhalb eines Ermessensspielraums festzulegen, wie bspw. bei der Griffigkeit einer Oberfläche.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch einen möglichen Abbau eines Abnutzungsvorrates:

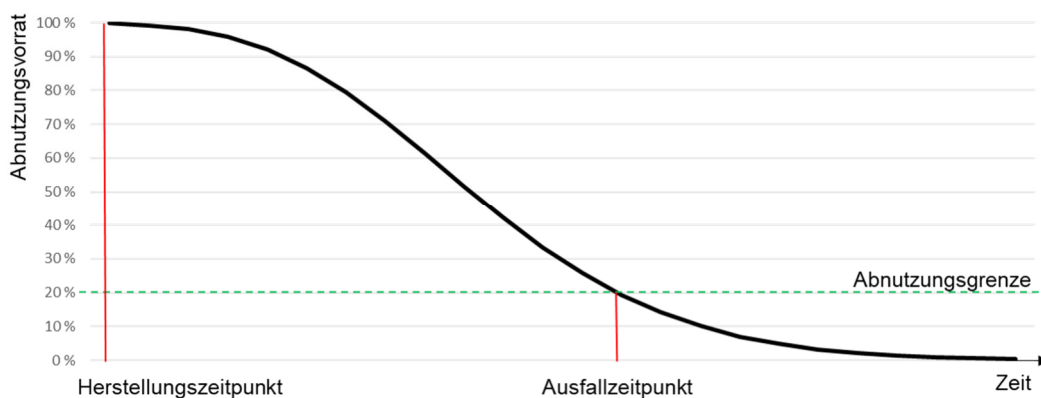


Abbildung 3-11: Exemplarischer Abbau eines Abnutzungsvorrates

Konform zur DIN 31051 entspricht der Abnutzungsvorrat der maximalen Spanne, die eine Betrachtungseinheit erleben kann, hier entspricht das 100 % und nicht der Spanne bis zur Abnutzungsgrenze (hier 80 %). Der Verlauf der Abbaukurve kann nach DIN unterschiedliche Formen haben, hier entspricht er der Zuverlässigkeitsfunktion einer Gamma-Verteilung.

3.3.3.2 Materielle Abnutzung

Durch die Abnutzung der Gebäudesubstanz aufgrund biologischer, chemischer, physikalischer und physischer Prozesse, und der damit einhergehenden Reduktion des Abnutzungsvorrates, altert das Baumaterial selbst. Es findet eine materielle, das heißt direkte, Abnutzung statt.

Beispiele für eine solche Abnutzung sind neben der Alterung auch Verschleiß oder Korrosion, ebenso aber auch plötzlich auftretende Zustandsänderungen wie Vandalismus oder Sturmschäden. Ist die Abnutzungsgrenze erreicht, ist auch die technische Lebensdauer des Bauteils vorüber. Instandsetzungsmaßnahmen wirken dem entgegen, indem sie Bauteile, deren Abnutzungsvorrat aufgebraucht ist, erneuern.²⁴⁶

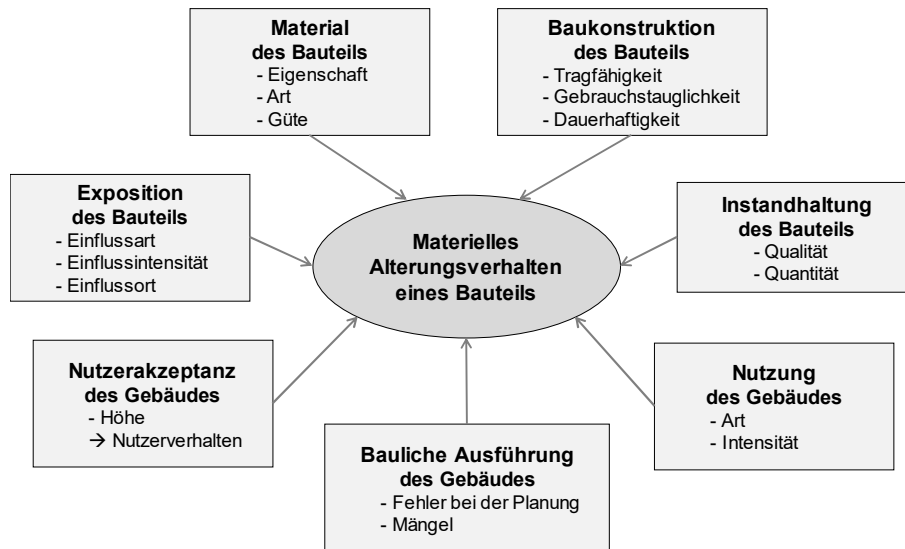


Abbildung 3-12: Einflüsse auf das materielle Alterungsverhalten eines Bauteils²⁴⁷

Die materielle Abnutzung kann durch Instandsetzungen praktisch unbegrenzt oft aufgehoben werden. Das wirkt sich positiv auf die technische Lebensdauer aus, wie später aufgezeigt wird.

3.3.3.3 Immaterielle Abnutzung

Unter der immateriellen Abnutzung einer Immobilie versteht man den Wertverlust, den eine Immobilie über ihre Lebensdauer erfährt, der dadurch begründet wird, dass sie wachsenden Anforderungen und Ansprüchen der Benutzer nicht mehr entspricht. Außerdem entspricht sie nach einer bestimmten Zeit nicht mehr dem Stand der Technik. Aufgrund der technischen Innovationen, die in Konkurrenzobjekten Verwendung finden, steigt deren Akzeptanz gegenüber dem nun veralteten Objekt.²⁴⁸ Die immaterielle Abnutzung ist nicht mit einem Abbau des Abnutzungsvorrates zu beschreiben.

Die immaterielle Abnutzung ist wirtschaftlich nicht mehr auszubessern. Aus ökonomischer Sicht ist eine Immobilie, die immateriell abgenutzt ist, nicht mehr rentabel, unabhängig von der

²⁴⁶ Vgl. Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 07/2014), S. 1–35.

²⁴⁷ Vgl. Bleifuß, Mariana: *Prognose von Lebenszykluskosten bei Hotelimmobilien* (Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 2009), S. 29.

²⁴⁸ Vgl. Zimmermann, Josef: *Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 07/2014), S. 1–35.

materiellen Abnutzung. Lediglich mittels Modernisierungen kann versucht werden, diese Form der Abnutzung auszugleichen, um den Vorsprung der Konkurrenzprodukte aufzuholen oder zu übersteigen.

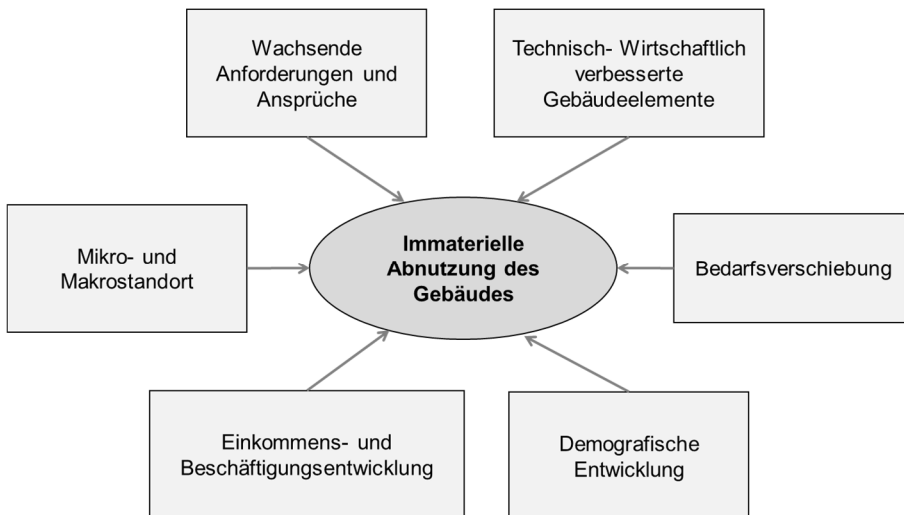


Abbildung 3-13: Einflüsse auf die immaterielle Abnutzung des Gebäudes²⁴⁹

3.3.4 Beschreibung der Alterung durch Zeitdauern

Anders als bei der Beschreibung der Alterung mittels Abnutzung bzw. über den festgestellten Zustand einer Betrachtungseinheit, was eine direkte Beschreibungsmethode darstellt, kann auch eine indirekte Beschreibung erfolgen. Dabei handelt es sich im Allgemeinen um die Dauer, die nötig ist, bis die Betrachtungseinheit die Grenze ihrer Funktionsfähigkeit erreicht hat.

Diese Dauer wird in der Literatur als Lebens- bzw. Nutzungsdauer angegeben. Die beiden Begriffe können im Kontext der Instandhaltung synonym verwendet werden, wenngleich die Lebensdauer eigentlich „lebenden“ Objekten zusteht. Leblose Materie wie Immobilienobjekte besitzen demnach eine Nutzungsdauer. Entsprechend Kapitel 3.3.2 handelt es sich um die technische Nutzungsdauer.

Betrachtet man die in der Literatur vorkommenden Nutzungsdauerempfehlungen, so kann beobachtet werden, dass einige Quellen verallgemeinert werden können. So kann eine Einheit i eine Nutzungsdauer von 80 Jahren in Quelle A aufweisen und von 100 Jahren in Quelle B. Die Einheit j dagegen hat eine Nutzungsdauer von 40 (A) bzw. 50 (B) Jahren. Weitere Elemente werden als Teiler bzw. Vielfache voneinander abgebildet. Somit sind diese Quellen voneinander abhängig. Lediglich ein beliebiges Element müsste angepasst werden und sie wären kongruent.

²⁴⁹ Vgl. Bleifuß, Mariana: *Prognose von Lebenszykluskosten bei Hotelimmobilien* (Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 2009), S. 31.

Generell ist die Belastbarkeit solcher Nutzungsdauern fragwürdig. Die Angaben sind deterministischer Natur und versuchen einen Erwartungswert anzugeben. Eine Betrachtungseinheit kann nun vorher ausfallen und somit einen Schaden durch die Ausfallzeit erzeugen oder länger leben und so einen ökonomischen Schaden durch sein Restpotential, welches ihm noch innewohnt, verursachen. Eine Unbekannte innerhalb der Literatur ist stets die Wahrscheinlichkeit, die angenommen wird, um die Funktionsfähigkeit der Einheit nach der Nutzungsdauer anzugeben. Instandhaltungsstrategien, welche sich auf Nutzungsdauern stützen, sind von der Qualität der Nutzungsdauern abhängig.

Darüber hinaus antizipiert dieses Vorgehen gleiche Nutzungsdauern scheinbar gleicher Elemente an unterschiedlichen Orten. Erweitert wird dieses Modell daher durch die DIN ISO 15686. Dabei definiert sie sieben Einflussfaktoren, die sich auf die Referenzlebensdauer beziehen. Drei davon beziehen sich auf die Bauteilqualität, nämlich die Komponentenqualität, die Konstruktionsqualität sowie die Ausführungsqualität. Die Umgebung wird mittels der beiden Faktoren der Innen- sowie der Außeneinflüsse berücksichtigt. Und die Gebrauchsqualität geht über die Faktoren der Nutzungsintensität und der Instandhaltungsqualität in die spezifische Lebensdauer der Gebäudekomponente ein, die sich als Produkt der Referenzlebensdauer und der sieben Faktoren ergibt. Jedoch steht und fällt auch diese Methode mit der objektiven Einschätzung und der Auswahl der Parameter.

3.3.5 Instandhaltungsbedarf und Instandhaltungsrückstau

Unter dem Instandhaltungsbedarf versteht man die Mittel, die benötigt werden, um die anfallenden Aufwendungen für die Instandhaltung decken zu können. Dabei können die jährlichen Aufwendungen sehr unterschiedlich sein. Maßgeblich beeinflusst werden sie von der gewählten Art und Strategie der Instandhaltung. Der Instandhaltungsbedarf kann unterschieden werden in einen theoretischen (jährlichen) Bedarf, bei dem die Kosten für das Bauteil über dessen Lebensdauer verteilt werden, und den tatsächlichen Bedarf, bei dem die Kosten im Jahr des Ausfalls anfallen.

Wird die Instandhaltung nicht ordnungsgemäß ausgeführt oder ausgesetzt, so entsteht über diesen Zeitraum ein Instandhaltungsrückstau. Die Instandhaltungskosten, deren Aufwendungen versäumt wurden, stauen sich dann auf. Aufgrund des Unterschiedes zwischen der theoretischen Lebensdauer und der tatsächlichen Lebensdauer muss der Instandhaltungsrückstau dabei nicht die Summe der versäumten Instandhaltungen betragen. Hierbei ist die Instandhaltungsstrategie, die der Rechnung zugrunde liegt, entscheidend. Gleichzeitig kann sich aber ein Rückstau nachteilig auf andere Betrachtungseinheiten auswirken und deren Alterung begünstigen. Oftmals wird der Instandhaltungsrückstau nicht durch das Nachholen der versäumten Instandhaltung abgebaut, sondern durch eine Modernisierung.

3.3.6 Maßnahmen der Instandhaltung

Die Maßnahmen, wie sie in der folgenden Abbildung dargestellt sind, lassen sich in erhaltende und verändernde unterscheiden. Instandhaltung ist dabei den erhaltenden Maßnahmen zuzuordnen, Modernisierungen, Umbauten und Erweiterungen dagegen den verändernden.

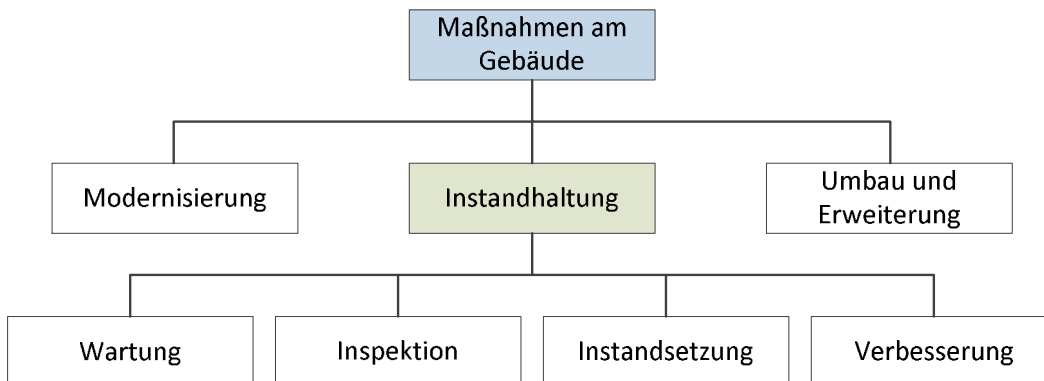


Abbildung 3-14: Maßnahmen am Gebäude zu dessen Erhaltung und Veränderung²⁵⁰

Die Instandhaltung beschreibt die Maßnahmen technischer, administrativer und managementbezogener Natur, die darauf abzielen, die Erhaltung eines funktionsfähigen Zustandes des Objektes über den Lebenszyklus zu gewährleisten oder diesen wiederherzustellen.²⁵¹ Die Instrumente dieser Gewährleistung sind Wartung, Inspektion und Instandsetzung mit der Option der Verbesserung. Die HOAI definiert die Instandhaltung kurz und prägnant als „Maßnahmen zur Erhaltung des Soll-Zustandes eines Objekts“.²⁵² Diese Maßnahmen werden im Folgenden erläutert.

3.3.6.1 Wartung

Geht man davon aus, dass sich ein betrachtetes Objekt über einen bestimmten Zeitraum abnutzt, bis es den Punkt des Ausfalls erreicht, so kann die Wartung als jener Prozess verstanden werden, der diesen Ausfallpunkt hinauszögert. Der Prozess findet dabei über den gesamten Zeitraum statt. Die Wartung beugt dem Ausfall vor, indem die Abnutzungsrate reduziert und die Lebensdauer verlängert wird. Entsprechend beschreibt auch die DIN 31051 den Begriff Wartung als „Maßnahmen zur Verzögerung des Abbaus des vorhandenen Abnutzungsvorrats“ bzw. Zimmermann als „Reinigungs- und Pflegemaßnahmen (z.B. auswechseln, schmieren, nachstellen), die der Bewahrung des Soll-Zustandes dienen und Verschleiß- und Abnutzungsvorgänge verzögern.“²⁵³ Bezogen auf das Modell des Abnutzungsvorrates findet eine

²⁵⁰ Vgl. Kalusche, Wolfdietrich: *Nutzungskosten im Hochbau - Grundlagen und Anwendung* (, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2005), S. 13.

²⁵¹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH).

²⁵² *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen, HOAI*, Bundesrepublik Deutschland (17.07.2013), § 2, Abs. 9.

²⁵³ Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2013), S. 1–33.

Verlangsamung statt. Graphisch zu sehen in der folgenden Abbildung durch die Abflachung der Abbaukurve.

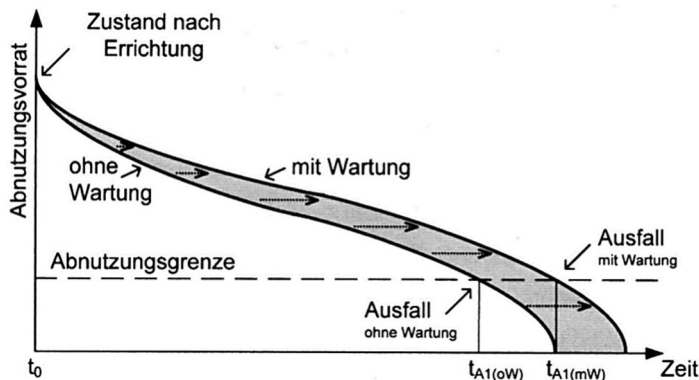


Abbildung 3-15: Beispielhafter Verlauf der Abbaukurve des Abnutzungsvorrats unter Berücksichtigung von Wartungsmaßnahmen²⁵⁴

3.3.6.2 Inspektion

Die Inspektion findet in regelmäßigen Intervallen, den sog. Inspektionsintervallen statt. Ihr Ziel besteht in der Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustandes einzelner Komponenten des Gebäudes. Sie werden hinsichtlich etwaiger Schäden oder Abnutzungen untersucht bzw. überprüft, die während des vergangenen Intervalls aufgetreten sind. Anschließend ist abzuwägen, ob in nächster Zeit ein Schaden oder Ausfall zu erwarten ist, woraufhin gegebenenfalls Maßnahmen zur Gegensteuerung vereinbart werden.²⁵⁵ Ihr Ziel liegt in der frühzeitigen Feststellung des aktuellen Zustandes und der Möglichkeit des Steuerns der Instandhaltungsbedürfnisse. Die Ergebnisse der Inspektion können somit als Grundlage einer nachhaltigen Instandhaltungsplanung angesehen werden.²⁵⁶ Die Inspektion hat einen vorbeugenden Charakter und ist ein Zeichen einer vorrausschauenden Instandhaltungsstrategie. Sie liefert ferner eine Bestandsaufnahme und -beurteilung. Durch die Wiederkehr in regelmäßigen Intervallen können durch den Vergleich der verschiedenen Bestandsaufnahmen außerdem verschiedene Informationen über die zeitlichen Veränderungen gewonnen werden.

Die DIN 31051 definiert die Inspektion als „Maßnahmen zur Feststellung und Beurteilung des Ist-Zustands einer Einheit,²⁵⁷ einschließlich der Bestimmung der Ursachen der Abnutzung und dem Ableiten der notwendigen Konsequenzen für eine künftige Nutzung.“

²⁵⁴ Vgl. Klingenberger, Jörg: *Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden* (Dissertation, Institut für Baubetrieb, TU Darmstadt, 2007), S. 26.

²⁵⁵ Vgl. Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2013), S. 1–33.

²⁵⁶ Vgl. Hoffmann, Klaus: *Handbuch corporate real estate management*, 2., aktualisierte und erw. Aufl., Immobilien-Wissen (Köln: Müller, 1998).

²⁵⁷ „Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Funktionseinheit, Betriebsmittel oder System, das/die für sich allein beschrieben und betrachtet werden kann.“ (DIN 31051).

3.3.6.3 Instandsetzung

Unter Instandsetzung versteht die HOAI in § 3, Abs. 8 „Maßnahmen zur Wiederherstellung des zum bestimmungsgemäßen Gebrauch geeigneten Zustandes (Soll-Zustandes) eines Objekts“. Auch die DIN 31051 definiert den Begriff. Hierbei handelt es sich um eine „physische Maßnahme, die ausgeführt wird, um die Funktion einer fehlerhaften Einheit wiederherzustellen.“ Allgemein gesprochen wird der Abnutzungsvorrat einer Einheit wiederhergestellt, bis auf seine ursprüngliche Höhe.

Die folgende Abbildung zeigt diesen Vorgang auf zwei verschiedene Arten. Als Idealfall (oder auch Grenzfall) sowie in zwei Realfällen. Im Idealfall findet der Austausch im Moment des Ausfalls statt. Anders als in der Realität üblich, weshalb sich hier der Begriff Realfall etabliert hat. Da der Zeitpunkt der Abnutzungsgrenze nur schwer vorherzusehen ist, würde die Einheit entweder vor (Realfall 1) oder nach (Realfall 2) ihrem Ausfall ausgetauscht. Es findet entweder ein ökonomischer Schaden statt, weil eine nicht bis zur Ermüdung genutzte Einheit ausgetauscht wird oder ein Schadensfall mit einer gewissen Schadensdauer, weil der Austausch nach dem Ausfall stattfindet. Die Differenz zwischen Real- und Idealfall zu minimieren, ist Aufgabe der Inspektion.

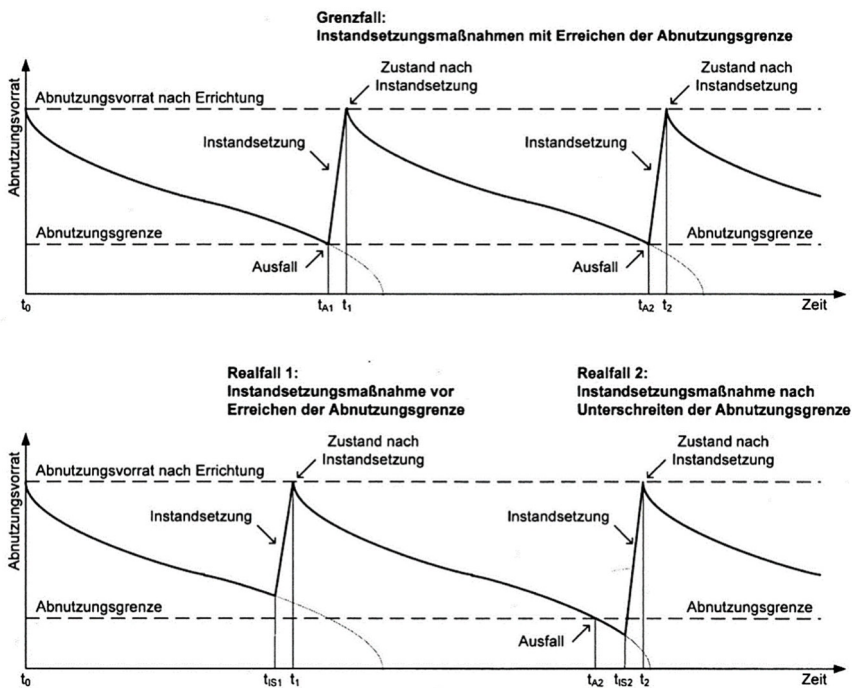


Abbildung 3-16: Beispielhafter Verlauf der Abbaukurve des Abnutzungsvorrats unter Berücksichtigung von Instandsetzungsmaßnahmen²⁵⁸

Da die Instandsetzung von sehr umfangreicher Natur ist, reichen die Definitionen von DIN und HOAI in der Praxis nicht aus, um Maßnahmen zu konkretisieren. Aus diesem Grund haben

²⁵⁸ Vgl. Klingenberger, Jörg: *Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden* (Dissertation, Institut für Baubetrieb, TU Darmstadt, 2007), S. 27.

einzelne Institutionen den Begriff durch weitere Unterscheidungen differenziert. Die GEFMA Richtlinie 122 unterscheidet zwischen der kleinen und der großen Instandsetzung. Dabei beschreibt die *kleine Instandsetzung* Arbeiten wie den Austausch von Verschleißteilen. Diese Leistungen werden oft im Rahmen der ohnehin fälligen Wartung durchgeführt und können vom Betriebspersonal ausgeführt werden. Die *große Instandsetzung* ist dann jede Wiederherstellung des Soll-Zustandes, welche über die kleine Instandhaltung hinausgeht. Es handelt sich somit um separate Instandhaltungsereignisse, trivial als Reparaturen bezeichnet.²⁵⁹

Ein wichtiger Grund für diese Trennung ist die Kalkulation der Kosten. Die kleinen Instandsetzungen können nach BetrKV als Betriebskosten auf die eventuell vorhandenen Mieter umgelegt werden. Die Kosten großer Instandsetzungen dagegen trägt immer der Eigentümer. Daher ordnet die Richtlinie 108 die kleinen Instandsetzungen eindeutig den Betriebskosten (und somit der KG 300 nach DIN 18960) und die großen Instandsetzungen eindeutig den Instandsetzungskosten (KG 400 nach DIN 18960) zu.²⁶⁰

Ähnlich unterscheidet auch Zimmermann bei der Instandsetzung zuerst zwei Fälle: Die *Ersatzinstandsetzung (EIS)* als Rückführung einer Einheit in den ursprünglichen Soll-Zustand durch einen Austausch. Dieser soll stattfinden, wenn die Einheit ihre Lebensdauer erreicht hat.²⁶¹ Der Austausch unterliegt der Annahme, dass der Einheit mit Erreichen der Lebensdauer keine Gewährleistung mehr hinsichtlich Funktionsfähigkeit und Sicherheit zugesprochen werden kann.

Die *Betriebsinstandsetzung (BIS)* wird definiert als Ertüchtigungs- sowie Ausbesserungsmaßnahmen. Sie werden der Wartung zugeordnet.²⁶² Es handelt sich um die Rückführung in den Soll-Zustand durch Austausch von Baugruppen. Die Funktionsfähigkeit soll dabei nur kurzfristig beeinflusst werden. Bei der Betriebsinstandsetzung wird eine Einheit aufgrund eines (zu erwartenden) Defektes ausgetauscht. Obwohl diese Einheit der Wartung unterliegt, geschieht dieser Vorgang außerhalb des Wartungszyklus. Dadurch ist die Betriebsinstandsetzung eindeutig von der Wartung zu unterscheiden, auch wenn sie dieser zugeordnet wird.²⁶³ Durch diese Zuordnung wird sie zudem den Betriebskosten zugeordnet.

²⁵⁹ Vgl. Hellerforth, Michaela: *Handbuch Facility Management für Immobilienunternehmen* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006). doi:10.1007/3-540-32197-7, S. 249 f.

²⁶⁰ Vgl. Hellerforth, Michaela: *Handbuch Facility Management für Immobilienunternehmen* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006). doi:10.1007/3-540-32197-7, S. 249 f.

²⁶¹ Vgl. Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2013), S. 1–33.

²⁶² Vgl. Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2013), S. 1–33.

²⁶³ Vgl. Zimmermann, Josef e. a.: *INSP-EG. Instandsetzungsprognose für Empfangsgebäude – Schlussbericht* (Studie, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 2007), S. 18 f.

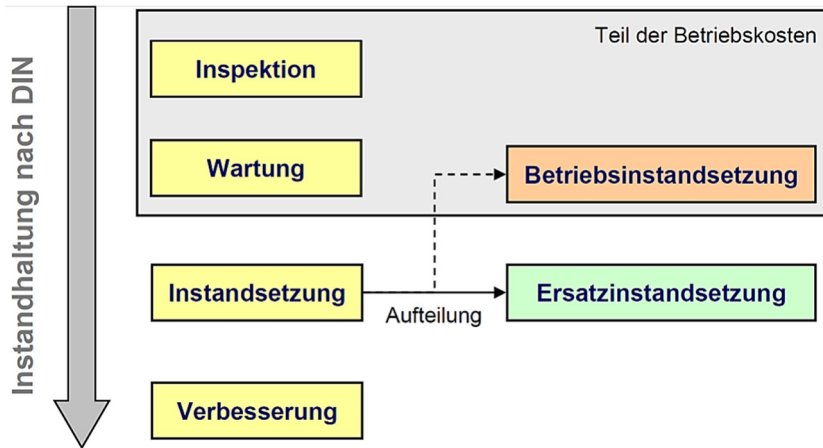


Abbildung 3-17: Abgrenzung Instandsetzung nach Zimmermann²⁶⁴

3.3.6.4 Verbesserung

Eine besondere Maßnahme innerhalb der Instandhaltung stellt die Verbesserung dar. Sie dient zwar der Erhaltung, nämlich der Rückführung des Ist-Zustandes in Richtung des Soll-Zustandes, jedoch noch über diesen hinaus. Dabei findet der Austausch der Einheit, wie bei den erhaltenden Maßnahmen üblich, mit Erreichen der Lebensdauer bzw. im Falle eines Ausfalls statt.²⁶⁵

Die DIN 31051 konkretisiert die Verbesserung als „die Steigerung der Zuverlässigkeit und/oder Instandhaltbarkeit und/oder Sicherheit einer Einheit, ohne ihre ursprüngliche Funktion zu ändern“.

Die Verbesserung erzeugt einen höheren Abnutzungsvorrat als die ursprüngliche Einheit bei Einbau besaß, das Niveau nach der Verbesserung ist dadurch höher als 100 %. Dadurch soll die Abnutzungsdauer der verbesserten Einheit höher sein als bei einer vergleichbaren, aber nicht verbesserten Einheit. Die folgende Abbildung zeigt den Grenzfall:

²⁶⁴ Vgl. Zimmermann, Josef e. a.: *INSP-EG. Instandsetzungsprognose für Empfangsgebäude – Schlussbericht* (Studie, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 2007), S. 5.

²⁶⁵ Vgl. Zimmermann, Josef: *Immobilienprojektentwicklung* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2013), S. 1–33.

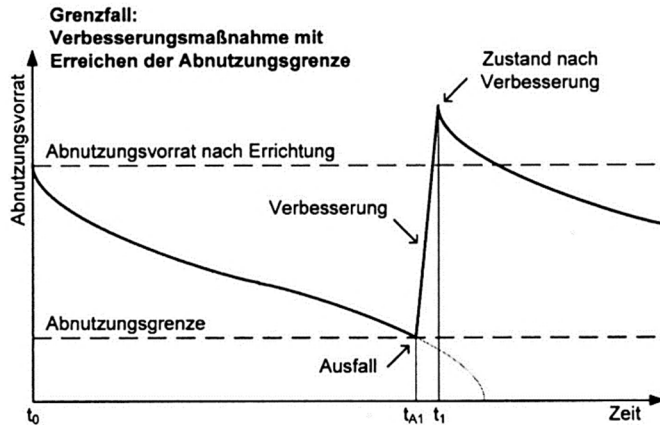


Abbildung 3-18: Beispielhafter Verlauf der Abbaukurve des Abnutzungsvorrats unter Berücksichtigung von Verbesserungsmaßnahmen²⁶⁶

3.3.7 Arten der Instandhaltung

Während sich die Maßnahmen mit der Instandhaltung an sich beschäftigen, ist es Aufgabe der Instandhaltungsart, diese vor dem Horizont ihrer Ausführung zu planen. Hinsichtlich Zeit und Ort der Maßnahmen beschreibt die Norm zahlreiche Instandhaltungsarten, die im Folgenden, auch vor dem Hintergrund der Strategiefindung, skizziert werden sollen. Dabei folgt die Beschreibung der Gesinnung der DIN EN 13306.

Unterstellt man der Instandhaltungsabsicht, dass explizit keine inhärenten Abhängigkeitsmerkmale geändert werden sollen, so lässt sich die Instandhaltung in erster Ebene in präventive und korrektive unterteilen.

Die *präventive Instandhaltung* wird nach bestimmten Kriterien oder in festgelegten zeitlichen Intervallen ausgeführt. Sie soll die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines (Teil-)Ausfalls reduzieren. Sie findet dementsprechend vor dem Ausfall, bei gegebener Funktionsfähigkeit, statt.

Die *korrektive Instandhaltung* dagegen wird erst nach der Erkennung von Fehlern ausgeführt. Sie soll eine Betrachtungseinheit wieder in einen funktionsfähigen Zustand versetzen. Im Gegensatz zur präventiven Instandhaltung finden die Maßnahmen hier erst nach einem Ausfallereignis statt.

Wird bei der korrektiven Instandhaltung unverzüglich nach Erkennen des Ausfallereignisses mit der Instandhaltung begonnen, so handelt es sich um eine *sofortige korrektive Instandhaltung*. Da hier der Eintritt des Ausfallereignisses nicht planbar ist, ist auch die Instandhaltungsart eine nicht planbare.

²⁶⁶ Vgl. Klingenberg, Jörg: *Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden* (Dissertation, Institut für Baubetrieb, TU Darmstadt, 2007), S. 29.

Wird die korrektive Instandhaltung der Betrachtungseinheit zeitlich verschoben, so handelt es sich um eine *aufgeschobene korrektive Instandhaltung*. Dabei wird die Maßnahme nach individuell vorgegebenen Regeln verschoben, sodass diese Instandhaltungsart eine planbare darstellt.

Bezüglich der präventiven Instandhaltung spielt die Entscheidungsgrundlage eine wesentliche Rolle. So kann die Instandhaltung in Abhängigkeit von einem Zeitintervall stattfinden oder nach einer vorher definierten Anzahl an Nutzungen. In diesem Fall handelt es sich um *vorausbestimmte Instandhaltung*. Ferner handelt es sich um eine planbare Instandhaltungsart.

Wird als Grundlage eine Zustandsermittlung vorausgesetzt, handelt es sich um eine *zustandsorientierte Instandhaltung*. Dabei wird die Arbeitsweise der Betrachtungseinheit mittels Messverfahren überprüft und analysiert. Diese Instandhaltungsart ist, genau wie die daraus abgeleiteten Arten, eine planbare Instandhaltungsart.

Diese Zustandsanalyse kann als Grundlage für die Instandhaltung verwendet werden. Da in diesem Fall kein Blick in die Zukunft (Prognose) stattfindet, handelt es sich hierbei um eine *nichtvoraussagende Instandhaltung*.

Findet dagegen auf den Ergebnissen der Zustandsanalyse(n) eine Ableitung von für den Abbau einer Einheit wichtigen Kenngrößen und Parameter statt, so handelt es sich um eine *voraussagende Instandhaltung*, die auf der Abwägung zukünftiger Möglichkeiten beruht.

Bei beiden Arten, der voraussagenden wie auch der nichtvoraussagenden, ist es das Ziel, die Abnutzung (der Abbau des Abnutzungsvorrats) ihrerseits abzubauen (den Abnutzungsvorrat wiederherzustellen). Man bezeichnet die den beiden Arten zugrundeliegenden Maßnahmen in diesem Fall als *aktiv präventive Instandhaltungsmaßnahmen*.

Die planbaren Instandhaltungsarten, die vorausbestimmte, die zustandsorientierte und die aufgeschoben korrektive, können solcherart verknüpft werden, dass der Nutzen aus mehreren Maßnahmen (verschiedener Betrachtungseinheiten) bei geringeren Kosten, Nichtverfügbarkeiten oder Ähnlichem, realisiert werden kann. In diesem Fall bezeichnet man die Instandhaltungsart als opportunistische Instandhaltung.

In der folgenden Abbildung sind die verschiedenen Instandhaltungsarten sowie ihre Verknüpfung zueinander zusammenfassend dargestellt.

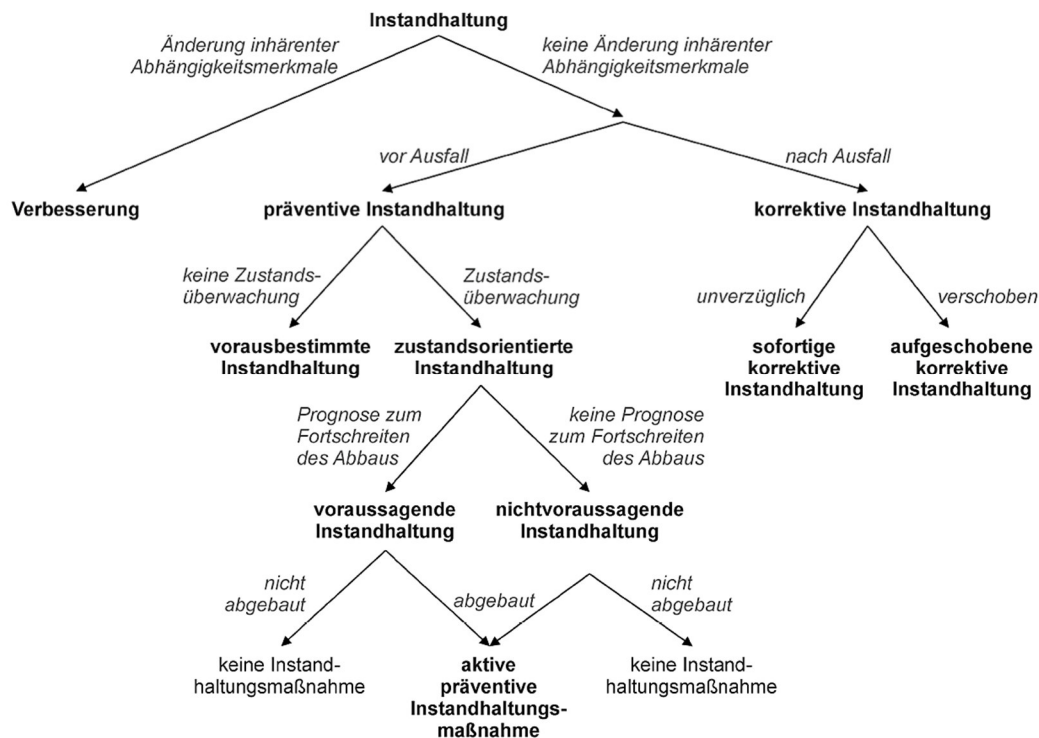


Abbildung 3-19: Instandhaltungsarten nach DIN EN 13306 (2015)²⁶⁷

3.3.8 Strategien der Instandhaltung

Die Instandhaltungsstrategie beschreibt jene Vorgehensweise, die das Management zum Erreichen der Instandhaltungsziele ausführt.²⁶⁸ Es handelt sich um die übergeordneten Randbedingungen zur Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen an einer den Betrachtungseinheiten übergeordneten Einheit innerhalb ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer. Als Instandhaltungsziel gilt gemeinhin die Funktionsfähigkeit der Anlage, es können jedoch auch weitere Parameter hinsichtlich dieser Funktionsfähigkeit vereinbart werden, die bspw. Zustand, Nutzungsdauer oder Kosten berücksichtigen.

Generell wird die Instandhaltungsstrategie regeln, zu welchem Zeitpunkt die jeweiligen Maßnahmen ergriffen werden sollen. Dabei berücksichtigt sie neben den wirtschaftlichen Aspekten vor allem auch rechtliche, sicherheitstechnische und produktionsrelevante.²⁶⁹ Dabei lässt sich die zeitliche Einordnung der Maßnahmen in systematische und unsystematische Natur unterscheiden. Bei unsystematischer Instandhaltung würden die Maßnahmen beim Auftreten eines Schadens oder Ausfalls ausgeführt. Ein systematischer Ansatz würde dagegen auf zeitlichen oder nutzungsspezifischen Intervallen basieren oder einen zustandsorientierten Ansatz

²⁶⁷ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 23.

²⁶⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 5 Punkt 2.4.

²⁶⁹ Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 26.

verfolgen.²⁷⁰ Der zweite Ansatz würde zudem Randbedingungen wie Produktionspausen berücksichtigen und versuchen, diese zu seinen Gunsten auszulegen.

Aus dieser, grundsätzlich verschiedenen, Natur der Instandhaltung lassen sich zwei Arten von Instandhaltungsstrategien ableiten. Diese bauen auf den verschiedenen Arten der Instandhaltungen aus 3.3.7 auf. Die systematische Instandhaltung kann als Grundlage einer präventiven Instandhaltungsstrategie verstanden werden, die weiter unterschieden werden kann, in die *vorausbestimmte*, die *zustandsorientierte* und die *zustandsorientiert, voraussagende*. Die unsystematische Strategie, die auf Vorfälle reagiert und diese korrigiert, dient als Grundlage für korrektive Instandhaltungsstrategien, die sich weiter untergliedern, in die *sofortige* und die *aufgeschobene*.

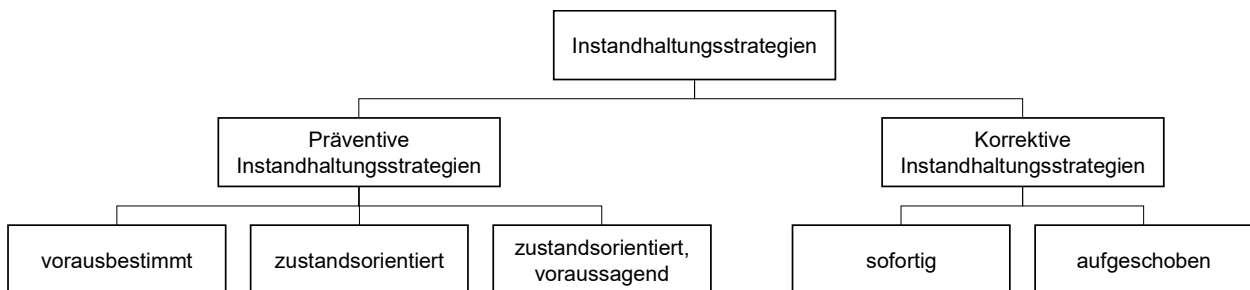


Abbildung 3-20: Instandhaltungsstrategien

3.3.8.1 Präventive Instandhaltungsstrategien

Präventive Strategien sollen einem möglichen Ausfall vorbeugen, bzw. die Anzahl an Ausfällen minimieren. Dabei werden Maßnahmen solcherart geplant, dass die Funktionsfähigkeit einer Einheit im Idealfall stets gegeben ist.

3.3.8.1.1 Vorausbestimmte

Die vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie ist eine periodisch vorbeugende.²⁷¹ Das bedeutet, dass in bestimmten Intervallen Maßnahmen durchgeführt werden. Dabei wird, unabhängig von den tatsächlichen Gegebenheiten, instandgehalten. Der tatsächliche Zustand der Komponenten wird dann ignoriert. Das Ausfallrisiko ist mit der Wahl des Intervalls gekoppelt. Ist das Ausfallverhalten ausreichend bekannt, kann mit einem entsprechend niedrigen Intervall einem Großteil der Ausfälle zuvorgekommen werden.

²⁷⁰ Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 26.

²⁷¹ Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 28.

Der Grad der Planbarkeit ist bei dieser Instandhaltungsstrategie sehr hoch, da Zeitpunkte vorherbestimmt werden können und die Abläufe sich wiederholen. Gleichzeitig geht mit dem hohen Grad der Verfügbarkeit aber die Verschwendung mitunter hoher Restabnutzungsvorräte einher, da Komponenten früher ausgetauscht werden als eigentlich nötig.

Eine Anlage besteht in der Regel aus einer Anzahl von Komponenten und die wiederum ggf. aus mehreren Betrachtungseinheiten. Die vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie muss das Gefüge dieser Betrachtungseinheiten verstehen, um Intervalle in optimaler Weise vereinbaren zu können.

3.3.8.1.2 Zustandsorientierte

Die zustandsorientierte Strategie definiert ihr Instandhaltungsintervall nicht wie die vorausbestimmte durch einen zeitlichen Parameter, sondern greift auf eine Zustandsgröße zurück. Dabei beschreibt sie den Verlauf des Abnutzungsvorrates. Unterschreitet dieser einen vorgegebenen Wert, wird eine Instandhaltungsmaßnahme ausgelöst.²⁷²

Die Strategie setzt genaue Kenntnisse bezüglich des Zustandes und dessen Entwicklung voraus. Sind diese gegeben, können die Maßnahmen zur richtigen Zeit und damit äußerst effizient realisiert werden. Ggf. können diese Informationen durch Inspektionen festgestellt werden. Entweder durch klassische, menschliche Inspektionen oder durch softwaregestützte (teilweise permanente) Diagnosen. Ist die Abnutzung nicht messbar, ist diese Strategie jedoch hinfällig.

3.3.8.1.3 Zustandsorientierte, voraussagende

Die zustandsorientierte, voraussagende Instandhaltungsstrategie ist eine Weiterentwicklung der zustandsorientierten.²⁷³ Während in letzterer das Monitoring mit Blick auf die vergangenen Betrachtungsintervalle für die Instandhaltung maßgeblich ist, stellt die zustandsorientierte, voraussagende Instandhaltung ständige Soll-Ist-Vergleiche in den Vordergrund. Dabei werden zukünftige Verläufe der Abnutzung auf Basis der Zustandsüberwachung antizipiert. Die Ergebnisse werden weiter analysiert und auf Konsistenz überprüft. Potentielle Störungen sollen so im Voraus erkannt werden. Dazu wird davon ausgegangen, dass die Funktionsfähigkeit einer Anlage bereits gefährdet ist, wenn ein Ausfall einer untergeordneten Betrachtungseinheit bevorsteht. Die Verknüpfungen sämtlicher Betrachtungseinheiten, eine hierarchische Beziehung zwischen ihnen sowie die Auswirkungen auf die Funktionsfähigkeit der gesamten Anlage sollen die Abnutzung möglichst genau und vollständig beschreiben und prognostizieren.

²⁷² Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 30.

²⁷³ Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 31.

3.3.8.2 Korrektive Instandhaltungsstrategien

Korrektive Strategien stellen reaktive Instandhaltungen in den Vordergrund. Das bedeutet, dass der Instandhaltung ein Ausfall vorausgeht und anschließend eine Wiederherstellung in den funktionsfähigen Zustand stattfindet, die sog. Instandsetzung.

Ein zentraler Nachteil (aller korrektiven Strategien) ist zudem, dass eine garantierte Ausfallzeit vorliegt. Wenn während dieser Ausfallzeit ein Sicherheitsrisiko vorliegt, verbietet sich diese Strategie a priori.

3.3.8.2.1 Sofortige

Bei der sofortigen Instandhaltungsstrategie wird ein Ausfall unmittelbar nach Detektion beseitigt. Sie ist störungsbedingt, d. b., dass sie ohne Ausfallereignis nicht stattfindet. Nach allgemeiner Wortdefinition handelt es sich nur bedingt um eine Strategie, da es sich nicht um einen ausgearbeiteten, langfristigen Plan zur Erfüllung des Instandhaltungsziels, der Funktionsfähigkeit des Objekts, handelt.

Diese Strategie verbraucht den Abnutzungsvorrat komplett, der endet, wenn der Schadensfall eintritt. Dieser ist jedoch in der Regel nicht vorhersehbar, tritt plötzlich und ungeplant ein. Da ausgetauschte Einheiten kein Restnutzungspotential mehr aufweisen und eine Planung nicht notwendig ist, können hier Kosten gespart werden.²⁷⁴ Auf der anderen Seite müssen jedoch Ressourcen zur Instandhaltung wie Personal, Geräte und Material vorgehalten werden, um im Schadensfall schnell reagieren zu können.

3.3.8.2.2 Aufgeschobene

Bei der aufgeschobenen Instandhaltungsstrategie wird ein Ausfall nicht unmittelbar nach Detektion beseitigt. Auch sie ist störungsbedingt, d. b., dass sie ohne Ausfallereignis nicht stattfindet. Im Gegensatz zur sofortigen Instandhaltung findet hier zwar eine allgemeine Planung statt, jedoch erst auf die Zeit nach Eintritt des Ausfallereignisses.

Auch diese Strategie verbraucht den Abnutzungsvorrat komplett, der endet, wenn der Schadensfall eintritt. Da ausgetauschte Einheiten kein Restnutzungspotential mehr aufweisen und eine Planung nicht notwendig ist, können hier, wie bei der sofortigen Instandhaltung, Kosten gespart werden.²⁷⁵ Ressourcen zur Instandhaltung wie Personal, Geräte und Material werden nicht vorgehalten, da die schnelle Reaktion im Schadensfall nicht notwendig ist.

²⁷⁴ Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 28.

²⁷⁵ Vgl. Schenk, Michael: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs* (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010), S. 28.

3.3.8.3 Resümee

Fasst man die zustandsorientierte, voraussagende Strategie als Fortsetzung der zustandsorientierten auf, so lassen sich unter dieser Zusammenfassung insgesamt vier Strategien festhalten. Jede Strategie hat individuelle Vor- und Nachteile.

		Korrektive Strategien		Präventive Strategien	
		Sofortige IHS	Aufgeschobene IHS	Vorrausbestimmte IHS	Zustandsbestimmte (voraussagende) IHS
Sphäre der Instandhaltungsstrategie(en)	Maßnahmenplanbarkeit	-	-	+	+
	Planungsaufwand & -kosten	-	-	0	+
	Dokumentationsaufwand	-	-	0	+
	Inspektionsbedarf & -kosten	-	-	-	+
	Personalaufwand	-	-	0	+
	Störungsanfälligkeit	+	+	0	-
	Störungsbeseitigungszeit	+	+	0	-
	Ausfall-/Folgekosten	+	+	-	-
	Optimierungspotential	-	-	-	+
	Abstimmbarkeit mit Nutzer	-	-	0	+
Sphäre der Betrachtungseinheit(en)	Instandsetzungshäufigkeit & -kosten	-	-	+	0
	Instandsetzungsoptimierungspotential	-	-	0	+
	Ausnutzung des Abnutzungsvorrates	+	+	-	0
	Durchschn. Bauelementqualität	0	0	+	+
	Ausfallrisiko	+	+	0	-
	Dokumentationsqualität	-	-	0	+

Tabelle 3-3: Bewertung der Ausprägungen verschiedener Attribute der Strategien²⁷⁶

3.3.9 Instandhaltung in der Verkehrsinfrastruktur

Der aktuelle Status quo der Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur von Bundesfernstraßen entspricht dem aktuellen Stand eines langen Prozesses der Infrastrukturforschung. Entsprechend seiner Zeit ist er seit der Jahrtausendwende immer stärker EDV-geprägt und ohne durchgängige Rechnerunterstützung auf dem heutigen Niveau nicht mehr möglich.

Die einschlägige Literatur, welche die Instandhaltung für Infrastruktur heute sowohl direkt als auch indirekt beschreibt und bestimmt, lässt einen sehr starken Bezug zu einer Zustandsgröße erkennen, die gewissermaßen in den Mittelpunkt des Instandhaltungsmanagements gerückt ist. Wie die repräsentativen Literaturstellen zeigen, die im Folgenden beschrieben werden, werden

²⁷⁶ Nach Schönfelder, Uwe: *Verfahren zur Ermittlung des Abnutzungsvorrats von Baustoffen als Grundlage für Instandhaltungsstrategien am Beispiel der Gebäudehülle* (Dissertation, TU Dortmund, 2010), S. 62.

die Maßnahmen des Erhalts, zumindest in der Theorie, von dieser Zustandsbeschreibung abhängig gemacht.

Dabei stellt sich die Frage, ob bei einer solchen Betrachtung eine wirtschaftliche Untersuchung der verschiedenen Instandhaltungsstrategien möglich ist und somit die Instandhaltungsmöglichkeiten vollumfänglich berücksichtigt werden.

3.3.9.1 RPE-Stra 01 – Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen

Die Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen (RPE-Stra) – Ausgabe 2001 – beschreiben im Wesentlichen alle verwaltungstechnischen Planungsstufen einer effizienten und systematischen Straßenerhaltung. Es werden die notwendigen Schritte zusammengefasst, um aufgrund der vorhandenen (bzw. der laufend zu aktualisierenden) Netz-, Aufbau- und Zustandsdaten die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen systematisch planen zu können. Sie „dienen der Erhaltung der Leistungsfähigkeit, Verkehrssicherheit und/oder Substanz von Straßenbefestigungen unter Beachtung der Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit.“²⁷⁷

Die Erhaltung setzt sich aus der betrieblichen Erhaltung sowie der baulichen Erhaltung zusammen. Die bauliche Erhaltung wird in den RPE-Stra 01 in drei Maßnahmenarten unterteilt (vgl. Tabelle 3-4).

Die *Instandhaltung* wird als bauliche Unterhaltung definiert. Sie beinhaltet kleinere bauliche Maßnahmen zur Substanzerhaltung von Straßen an örtlich-punktuell begrenzten oder kleinflächigen Schäden, die ohne großen Aufwand sofort durchgeführt werden können.²⁷⁸

Die Maßnahmenart *Instandsetzung* enthält bauliche Maßnahmen auf größeren zusammenhängenden Flächen. Diese umfassen in der Regel die Fahrbahnbreite sowie eine Dicke von bis zu 4 cm. Die Instandsetzung dient der Substanzerhaltung sowie der Verbesserung von Verkehrsflächen.²⁷⁹

Der Begriff *Erneuerung* wird verwendet, sobald mehr als die Deckschicht betroffen ist. Sie umfasst die vollständige Wiederherstellung einer Verkehrsflächenbefestigung.²⁸⁰

²⁷⁷ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 5.

²⁷⁸ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 5.

²⁷⁹ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 19.

²⁸⁰ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 19.

Die Maßnahmendefinition ist dabei insofern nicht mit der DIN 31051 konform, als dort die Instandhaltung als Oberbegriff für die Maßnahmen *Wartung*, *Inspektion* und *Verbesserung*, vor allem aber *Instandsetzung* verwendet wird (vgl. 3.3.6). Die RPE-Stra 01 trennt die beiden Maßnahmen dagegen.

Erhaltung	Betriebliche Erhaltung	Kontrolle	
		Wartung (betriebliche Unterhaltung) z.B. Bankettschäden, Straßenreinigung, Winterdienst	
	Bauliche Erhaltung	U – Bauliche Unterhaltung (Instandhaltung) Punktuelle oder kleinflächige Maßnahmen z.B. Vergießen von Rissen, kleinflächige Flickarbeiten	
		Instandsetzung	I 1 – auf der Deckschicht großflächige Maßnahmen z.B. Oberflächenbehandlung, Dünnschichtbelag
			I 2 – an der Deckschicht großflächige Maßnahmen z.B. Hoch-/Tiefereinbau der Deckschicht
		Erneuerung	E1 – an der Decke großflächige Maßnahmen z.B. Hoch- oder Tiefereinbau der Decke
			E2 – an Tragschicht(en) / am Oberbau großflächige Maßnahmen z.B. Verstärkung, Tiefereinbau einschließlich der Tragschicht(en)

Tabelle 3-4: Übersicht zur Begriffssystematik der Straßenerhaltung²⁸¹

Die Richtlinien sind grundsätzlich ein Instrument, um die Erhaltung von Bundesfernstraßen in allen Bundesländern einheitlich zu planen und zu systematisieren. Dafür ist ein qualitativ hochwertiges Informationssystem notwendig, in dem die Daten selektiv gespeichert, laufend aktualisiert und, falls nötig, umstrukturiert werden können. Die wichtigsten Daten für die unterschiedlichen Aufgaben der Erhaltungsplanung von Straßen sind nach den RPE-Stra 01 datumsbezogen abzuspeichern. Sie umfassen die folgenden Punkte:²⁸²

- Leitdaten, wie das Land, Amt, Straßennummer und Netzknotennummern des Abschnitts sind immer anzugeben.
- Funktionsdaten (Parkplatz, Rad- oder Gehweg, Unfallrate, Unfalldichte etc.) dienen der Festlegung des Anforderungsniveaus.

²⁸¹ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 5.

²⁸² Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 6.

- Geometrische Daten (Kurvigkeit, Quer-, Längsneigung, Lichtraumprofil etc.) sowie Aufbaudaten (Schichtenaufbau, Deckentextur, Schichtenverbund) sind Voraussetzung für die Netzqualitätsbewertung.
- Zustandsdaten (allgemeine Unebenheiten, Spurrinntiefe, Flickstellen – abhängig davon, ob Asphalt oder Beton) sind als Zustandsgrößen zu hinterlegen.
- Erhaltungsmaßnahmen sind sowohl als Ist-Daten als auch als Soll-Daten aufzunehmen.
- Kostendaten sind entsprechend typisierter Querschnittsabmessungen festzulegen.

Nach erfolgter Zustandserfassung wird die voraussichtliche Zustandsentwicklung prognostiziert und auf Basis dieser (gegenwärtigen und zukünftigen) Zustandsabschätzung eine Erhaltungsstrategie entwickelt. Der Begriff ist dabei nicht mit dem Begriff der Instandhaltungsstrategie der einschlägigen Normen identisch. Die Entwicklung basiert auf folgenden Schritten:²⁸³

1. Ermittlung des aus technischer Sicht erforderlichen Erhaltungsbedarfs auf Grundlage der bewerteten Netzqualität und der voraussichtlichen Zustandsentwicklung (Soll-/Ist-Vergleich).
2. Ermittlung kurzfristig einzuleitender Maßnahmen bei verkehrssicherheits- und/oder substanzgefährdenden Zuständen.
3. Ermittlung des umsetzbaren Erhaltungsbedarfes unter Berücksichtigung
 - der im Planungszeitraum voraussichtlich zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel
 - vorhergesehener Um- und Ausbau-, Erweiterungs- sowie Brückenbaumaßnahmen, welche erforderliche Erhaltungsmaßnahmen ersetzen oder Art und Zeitpunkt einer Erhaltungsmaßnahme beeinflussen können.
4. Beschreibung der Probleme und der sich daraus ergebenden Aufgaben für die Erhaltungsplanung unter Berücksichtigung folgender Grundsätze:
 - Durchführung einer netzweiten, streckenbezogenen Erhaltungsplanung mit möglichst langen Erhaltungsintervallen.
 - Erzielung eines möglichst großen Nutzens bei der Verbesserung der Substanz der Straßen mit den zur Verfügung stehenden Haushaltsmitteln.
 - Vergleich der Investitionskosten (einschließlich der Kosten für die Verkehrssicherung und der Folgekosten) mit dem gesamtwirtschaftlichen Nutzen der Erhaltungsmaßnahmen (Wirtschaftlichkeitsvergleich).

²⁸³ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01* (Köln: FGSV, 2001), S. 9.

- Festlegung der Erhaltungsmaßnahmen aufgrund eines nachvollziehbaren Entscheidungsalgorithmus.
5. Überprüfung der Zielerreichung, das heißt der mittelfristig angestrebten Netzentwicklung und gegebenenfalls Modifikation der gewählten Erhaltungsstrategie.

Lediglich unter 4. wird hier ein Wirtschaftlichkeitsvergleich gefordert, ohne weitere Beschreibung. In der Praxis zeigt sich der geschilderte Sachverhalt, dass die Untersuchungen nicht in ausreichendem Maße bzw. ausreichendem Tiefgang durchgeführt werden (vgl. 3.1.7). Zudem wird eine Berücksichtigung durch Untersuchung der Auswirkungen auf den Zustand fundiert. Das ist zwar a priori nicht falsch, verstärkt aber die Abhängigkeit vom Parameter „Zustand“.²⁸⁴

3.3.9.2 FGSV AP 9 – Arbeitspapiere zur Systematik der Straßenerhaltung

Der Arbeitsausschuss „Systematik der Straßenerhaltung“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen stellt seine Arbeitsergebnisse in den Arbeitspapieren 9 vor. Die Gliederung der Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) der Fahrbahnoberflächen sowie die Erhaltungsplanung von Straßen werden im Folgenden dargelegt.

Zustandserfassung und -bewertung der Fahrbahnoberflächen von Straßen (ZEB)²⁸⁵:

Reihe M: Messtechnische Zustandserfassung

M 1 Vorbereitung

Vorbereitungen für die messtechnische Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen)

M 2 Zustandserfassung

Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen)

- Ebenheit im Längsprofil
- Ebenheit im Querprofil
- Griffigkeit
- Substanzmerkmale (Oberfläche)

Reihe V: Visuelle Zustandserfassung

V 1 Vorbereitung

Vorbereitungen für die visuelle Zustandserfassung von Straßennetzen (Außerortsstraßen)

V 2 Zustandserfassung

Außerortsstraßen, Asphalt

Außerortsstraßen, Zementbeton

²⁸⁴ Vgl. exemplarisch Stütze, Thomas: *Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen* (Berlin: Technische Universität, 2004).

²⁸⁵ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 - Gliederung* (Köln: FGSV-Verlag, 2007), S. 2.

Reihe A: Auswertung

A 1 Zustandsbewertung

Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung

Zustandsbewertung bei visueller Erfassung

Veranschaulichung und statistische Aufbereitung von Zustandsdaten

A 2 Datenorganisation und Historisierung

Hinweise zur Sammlung und Organisation von Zustandsdaten

Grundsätze der Historisierung von Zustandsdaten

Erhaltungsplanung:

Reihe R: Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen

R 1 Standardwerte der Programmkenngößen

R 2 Anforderungen an die Eingangsdaten

R 3 Ermittlung der Kostendaten

Reihe S: Substanzwert (Bestand)

S Substanzwert (Bestand)

Die Reihen M und V beschreiben die Verfahren der Zustandserfassung. Sie beschreiben sowohl Art und Ort der Anwendung als auch die Verfahren selbst.

Die Reihe A beschreibt den eigentlichen Prozess der Zustandsbestimmung. Es werden Art und Weise der Ableitung des Zustands aus den Ergebnissen der messtechnischen und visuellen Zustandserfassung beschrieben. Grundlage sind die vier Erhaltungsziele Verkehrssicherheit, Befahrbarkeit, Substanzerhalt und Umweltverträglichkeit, deren Erfüllung sich aus der Zustandserfassung ergeben soll.²⁸⁶

Das Arbeitspapier R umfasst die Anforderungen an die Art, die Ausprägung sowie die konkreten Werte der erforderlichen Eingangsgrößen für eine rechnergestützte Erhaltungsplanung.²⁸⁷ Ziel der Ansprüche an die Qualität der Eingangsgrößen ist die Absicht, eine gleiche Qualität für die Zielgrößen zu gewährleisten.

Die Aufgabe des Arbeitspapiers S besteht darin, eine Bewertungsmöglichkeit für die Erhaltungsplanung zu geben. Sie kann die eigentliche Substanzanalyse nicht ersetzen, sondern

²⁸⁶ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Reihe A – Auswertung; Abschnitt A1; Unterabschnitt A 1.1; Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung* (Köln: FGSV-Verlag, 2001), S. 4.

²⁸⁷ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Reihe R – Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen Abschnitt R1* (Köln: FGSV-Verlag, 2003), S. 3.

dient bei mittelfristigem Planungshorizont als Ersatz, wenn entsprechende Zeitreihen noch nicht netzweit vorliegen.²⁸⁸

3.3.9.3 VDI-Richtlinien

Die Begrifflichkeiten der Instandhaltung aus DIN 31051 und DIN 13306 sind allgemeingültig, dementsprechend sowohl im klassischen Hochbau als auch in der Infrastruktur anwendbar. Gleiches gilt für die VDI-Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). Deren selbsternanntes Ziel ist es, „positiven Einfluss auf die Entwicklung von Technik, Innovationen und den Technikstandort Deutschland zu haben.“²⁸⁹ Die Dokumente können als Handlungsanweisungen, Entscheidungsgrundlagen oder Bewertungsmaßstäbe dienen. Der Inhalt beschreibt den Stand der Technik und wird regelmäßig auf Aktualität überprüft.

Die fachlichen Arbeitsgrundlagen für die Instandhaltung sind in den Richtlinien VDI 2884 – 2895 beschrieben. Diese werden in der folgenden Tabelle angegeben:

VDI 2884	Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)
VDI 2885	Einheitliche Daten für die Instandhaltungsplanung und Ermittlung von Instandhaltungskosten – Daten und Datenermittlung
VDI 2886	Benchmarking in der Instandhaltung
VDI 2887	Qualitätsmanagement der Instandhaltung
VDI 2888	Zustandsorientierte Instandhaltung
VDI 2889	Einsatz wissensbasierter Diagnosemethoden und -systeme in der Instandhaltung
VDI 2890	Planmäßige Instandhaltung; Anleitung zur Erstellung von Wartungs- und Inspektionsplänen
VDI 2891	Instandhaltungskriterien bei der Beschaffung von Investitionsgütern
VDI 2893	Auswahl und Bildung von Kennzahlen für die Instandhaltung
VDI 2895	Organisation der Instandhaltung

Tabelle 3-5: Übersicht über relevante VDI-Richtlinien

Die VDI-Richtlinien sind rechtlich betrachtet Empfehlungen, die nicht als verbindlich anzusehen sind. Auch entbinden sie den Nutzer nicht von seiner Verantwortung. Dennoch werden sie rechtlich hoch angesehen und haben sich nicht zuletzt deswegen etabliert.²⁹⁰ Zudem sind sie mit den Ausführungen der einschlägigen DIN-Normen konform.

²⁸⁸ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Reihe S – Substanzwert (Bestand)* (Köln: FGSV-Verlag, 2003), S. 3.

²⁸⁹ Verein Deutscher Ingenieure: *Jahresbericht: Die VDI-Gruppe*, zuletzt geprüft am 23.05.2019.

²⁹⁰ Vgl. Verein Deutscher Ingenieure: *VDI-Richtlinien: Rechtliche Bedeutung der VDI-Richtlinien*, zuletzt geprüft am 23.05.2019.

3.3.9.4 Sonstige Literatur

Neben der vorgestellten Literatur besteht noch ein breiter Fundus an weiteren Quellen. Diese beziehen sich zum Teil auf die Ausführung und somit auf die Objektrealisierung. Für Maßnahmen des Erhalts gelten sie bei entsprechenden Maßnahmen jedoch ebenso. Aufgrund des deutlich spezifischeren Inhalts wird in der folgenden Tabelle nur eine Übersicht gegeben. Verwendete Literatur wird am Ort der Verwendung innerhalb der Methodengenerese angegeben.

Bezeichnung	Name	Anmerkung
ZTV ZEB-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien zur Zustandserfassung und -bewertung von Straßen	Vorbereitung, Durchführung, Auswertung, Bewertung und Qualitätssicherung der Zustandserfassung mit schnellfahrenden Messfahrzeugen im Detail
ZTV BEA-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Asphaltbauweisen	Maßnahmen der baulichen Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen mit Asphalt in Abhängigkeit von deren Zustand und dem angestrebten Erhaltungsziel
ZTV BEB-StB	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen – Betonbauweisen	Maßnahmen der baulichen Erhaltung von Verkehrsflächenbefestigungen mit Beton in Abhängigkeit von deren Zustand und dem angestrebten Erhaltungsziel
M BEB	Merkblatt für die Bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen aus Beton	Ergänzung der ZTV BEB-StB 02 hinsichtlich Instandhaltung (baulichen Unterhaltung), Instandsetzung und Erneuerung von Verkehrsflächen aus Beton
ASB	Anweisung Straßeninformationsbank	Zentrales Werkzeug der Straßenbauverwaltung in Deutschland. Datenbank für die kontinuierlich erhobenen Verkehrsdaten, Zustandsdaten, Umweltdaten, Unfalldaten sowie Wirtschaftlichkeitsdaten

Tabelle 3-6: Literatur zur Zustandsbewertung und Erhaltung

3.3.9.5 PMS – Pavement Management System

Das Pavement Management System (PMS) ist eine rechnergestützte Anwendung zur Unterstützung planender Ingenieure im Bereich der Bundesfernstraßen. Es handelt sich um ein modulares System, welches permanent weiterentwickelt wird, seit der ersten Anwendung 1999.²⁹¹

Die Ergebnisse der Zustandserfassung und -bewertung, die in Deutschland seit 1992 alle vier Jahre durchgeführt wird, liefern Eingabeparameter für die Anwendung. Diese Daten stellen

²⁹¹ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Pavement Management System (PMS)*, zuletzt geprüft am 24.05.2019.

Momentaufnahmen dar, die den aktuellen Zustand abbilden. Da für die Erhaltungsmaßnahme Intervalle, die in die Zukunft reichen, gebildet werden müssen, sind Vorhersagen für die Zustandsänderung notwendig. Das PMS kann diese Prognosen für die Fahrbahnoberfläche sowie die Fahrbahnsubstanz auf Grundlage bekannter Verläufe abschätzen.²⁹²

Die Bundesanstalt für Straßenwesen beschreibt das Pavement Management System anhand der folgenden 8 Module:²⁹³

1. Bildung von homogenen Abschnitten

Zunächst werden im ersten Modul gleichwertige Bereiche der aus der Zustandsbewertung (TP 4) als 100 Meter-Abschnitte vorliegenden Daten aus der Zustandserfassung (TP 1-3) zu größeren Abschnitten zusammengefasst und homogene Abschnitte gebildet.

2. Auswahl der zur Erhaltung anstehenden Abschnitte

Das zweite Modul wählt die zur Erhaltung anstehenden Abschnitte aus.

3. Mängelanalyse/Schadensursachen

Im dritten Modul schließt sich eine Mängelanalyse oder Analyse der Schadensursache an.

4. Prognose der Zustandsänderung

Im vierten Modul schließt sich eine Prognose der Zustandsänderungen an.

5. Bautechnisch mögliche Erhaltungsmaßnahmen

Im fünften Modul werden bautechnisch mögliche Erhaltungsmaßnahmen vorgeschlagen.

6. Bewertung und Reihung der Maßnahmenvarianten

Die Maßnahmen aus dem fünften Modul werden im sechsten Modul nach der Effektivität bewertet und als Ergebnis eine Reihung der Maßnahmenvarianten erzeugt.

7. Optimierung der Maßnahmenvarianten bei Budgetbegrenzung

Im siebten Modul folgt die Optimierung der Maßnahmenvarianten bei Budgetbegrenzung.

8. Kurz-/mittelfristiges Erhaltungsprogramm

Das achte Modul erarbeitet abschließend einen Vorschlag für das Erhaltungsprogramm.

Ergebnisse des PMS sind immer als Vorschläge zu verstehen, das Programm selbst als Unterstützung. Es ist immer die Einzelfallentscheidung von entsprechend versierten und autorisierten Personen notwendig.²⁹⁴

²⁹² Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Pavement Management System (PMS)*, zuletzt geprüft am 24.05.2019.

²⁹³ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Pavement Management System (PMS)*, zuletzt geprüft am 24.05.2019.

²⁹⁴ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Pavement Management System (PMS)*, zuletzt geprüft am 24.05.2019.

3.4 Bedeutung für die weitere Arbeit

Basierend auf dem vorhergehenden Kapitel lassen sich für die weitere Arbeit einige Zusammenhänge ableiten und feststellen.

Jochimsen beschreibt die Infrastruktur als Vorleistung, diese muss der Wirtschaft gegeben werden. Dabei darf sie nicht mit der Absicht einer Gewinnerzielung gegeben werden, da dies, u.a. nach Smith, nicht möglich ist. Eine gewinnerzielende Infrastruktur würde ihre Funktion in einer Volkswirtschaft verfehlen. Dementsprechend sollte die Erhaltung der Infrastruktur nach dem Prinzip der Notwendigkeit angestellt werden. Das bedeutet eine Priorisierung und Selektion der einzelnen Projekte. Ein Sparsamkeitsprinzip muss, wenn überhaupt, dem Notwendigkeitsprinzip untergeordnet werden.

Der volkswirtschaftliche Nutzen einer Infrastruktur kann, gesamtwirtschaftlich betrachtet, als der Nutzen für alle Individuen der Volkswirtschaft als ökonomische Wohlfahrt interpretiert werden. Je höher diese Wohlfahrt für ein Infrastrukturobjekt gegenüber einem anderen ausfällt, desto höher ist seine (volkswirtschaftliche) Wichtigkeit für die ökonomische Wohlfahrt der gesamten Volkswirtschaft.

Wichtiger als diese Größe ist jedoch ihre Reduktion als ein Schaden, der ihr entsteht. Dieser Schaden ist die zentrale Messgröße, die es zu minimieren gilt. So wäre eine achtspurige Straße, bei gleicher Auslastung einer jeden Fahrspur, volkswirtschaftlich gesehen von höherer Wichtigkeit als eine vierspurige, da hier ein höherer Verkehr fließt. Der Schaden durch den Wegfall je einer Richtungsspur würde jedoch eine Reduktion der Kapazität von lediglich 25 % für die achtspurige, allerdings in Höhe von 50 % für die vierspurige Straße bedeuten. Somit wäre der Verkehrsfluss der vierspurigen Straße wesentlich stärker gestört. Aus diesem Grund ist die Ausfallbedeutung der entscheidende Parameter, dem die Beachtung entgegengebracht werden muss.

Unter dem Aspekt der Kritikalität auf wirtschaftlicher Ebene (der globalen Funktionsebene) ist demzufolge die Ausfallbedeutung zu verstehen, die durch volkswirtschaftliche Parameter bewertet wird und unter an sich gleichartigen Verkehrsträgern jenen hervorhebt, der, als *primus inter pares*, lediglich und ausschließlich von größerer *wirtschaftlicher* Bedeutung ist. Der Begriff „Kritikalität“ soll im Kontext der Arbeit dementsprechend stärker in seiner ursprünglichen Bedeutung ausgelegt werden, wie er in der Zuverlässigkeitssystemtheorie, Kernphysik, Luft- & Raumfahrt und ähnlichem verwendet wird.

Als kritisch im Sinne der Bundesministerien für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe sowie für Sicherheit in der Informationstechnik erscheinen Infrastrukturen, die einen hohen Grad der Vernetzung physischer Natur aufweisen, was auf die Verkehrsinfrastruktur zweifelsfrei zutrifft. Sie ist als Basisinfrastruktur für die gesamte Volkswirtschaft wichtig. Je höher der Vernetzungsgrad,

desto größer ist das Versorgungsgebiet.²⁹⁵ Im Blick auf Bundesfernstraßen bedeutet dies, dass für sie aufgrund des hohen Anteils abgewickelter Verkehrsstärken und hohen potentiellen Verkehrsdichten die Bedeutung für das Gesamtsystem Verkehrsinfrastruktur sehr hoch ist, sie demzufolge besonders „kritisch“ sind.

Auf lokaler Ebene der einzelwirtschaftlichen Objekte soll der Aspekt der Kritikalität im Folgenden als Indikator verstanden werden, wenn die einzelnen Betrachtungseinheiten der Objekte untersucht werden. Dabei weisen Betrachtungseinheiten eine hohe Kritikalität auf, wenn ihre Ausfallbedeutung auf Objektebene hoch ist, d. b., dass ein Ausfall einer Betrachtungseinheit, die eine hohe Kritikalität aufweist, mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einer Einschränkung in der Funktionsfähigkeit des Objektes selbst führen wird. Kritikalität ist als Maß zu verstehen, welches die Ausfallbedeutung des Bauteils bzw. der Bauteilgruppe unter Berücksichtigung ihrer Wechselwirkungen innerhalb des Systems (des Objektes) beschreibt.

In der folgenden Abbildung werden die beiden Parameter, die Ausfallbedeutung auf volkswirtschaftlicher Ebene einerseits, und die Ausfallbedeutung auf objektspezifischer Ebene andererseits, in einer Matrixform qualitativ dargestellt. Die Kritikalität auf das gesamtwirtschaftliche System kann daraus abgeleitet werden.

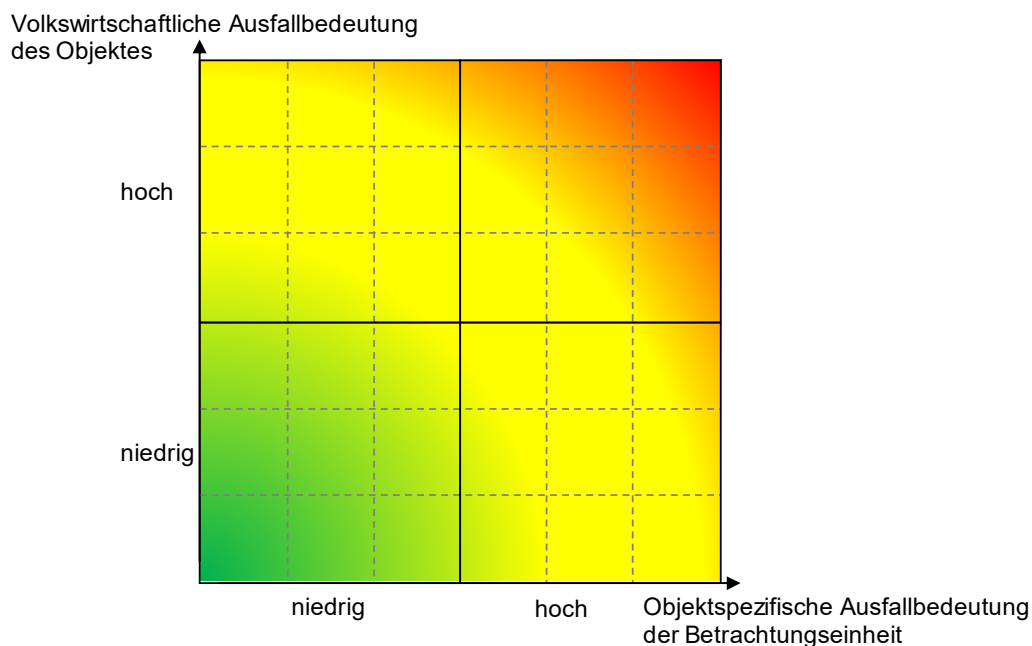


Abbildung 3-21: Qualitative Matrix des Zusammenhangs der unterschiedlichen Ausfallbedeutung

Die gesamtwirtschaftliche Kritikalität kann bis auf die niedrigste Ebene in sich abgeschlossener Betrachtungseinheiten erfolgen. Da diese von ihrer Funktion abhängig sind, bedeutet das, dass

²⁹⁵ Nach Strauß, Jürgen: *Infrastruktursicherheit* in: *Handbuch Sicherheitsgefahren*, hrsg. v. Thomas Jäger, Globale Gesellschaft und internationale Beziehungen (Wiesbaden: Springer VS, 2015), S. 346.

jene Positionen, die zusammen zur Erfüllung dieser Funktion führen, für sich zusammen als Funktionseinheit interpretiert werden können. Funktionseinheiten können als Punkte innerhalb der Matrix betrachtet werden, wobei ihnen das Objekt, dem sie angehören, als Index mitgegeben werden muss, da gleiche Funktionseinheiten unterschiedlicher Objekte unterschiedliche Kritikalität bezüglich des Gesamtsystems aufweisen können.

Der volkswirtschaftliche Schaden als Resultat eines Ausfallereignisses ist die maßgebende Größe bei der Untersuchung der Befriedigung der wirtschaftlichen Endnachfrage. Die monetäre Bewertung der Maßnahmen zum Erhalt der Infrastruktur in Geldeinheiten muss dabei im Grunde nebensächlich sein. Eine Volkswirtschaft wird immer bestrebt sein, eine funktionsfähige Infrastruktur vorzuweisen, da die Wirtschaft in enormem Maße davon abhängig ist. Gleichzeitig wird sie versuchen, die Mittel, die sie investiert, möglichst gering zu halten, nicht zuletzt, da der Nutzen nicht in Gewinngrößen messbar ist. Stattdessen muss die Allokation der Mittel vor dem Hintergrund der Minimierung des volkswirtschaftlichen Schadens die oberste Maxime darstellen. Dies geschieht, indem die Infrastrukturobjekte der Volkswirtschaft in der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit und anschließend in der Reihenfolge der Kritikalität ihrer Elemente gegliedert und darauf aufbauend die Maßnahmen abgestimmt werden.

Die gesamtwirtschaftliche Kritikalität kann als Grundlage für die Instandhaltung angesehen werden. Die unterschiedlichen Begriffe sowie die verschiedenen Arten und Strategien müssen dann hinsichtlich ihrer Anwendungen und Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der betrachteten Infrastruktur untersucht werden. Da ökonomisch betrachtet qualitativ mehr Geld in wichtige Einheiten investiert werden kann als in weniger wichtigere, wirkt sich dies auch auf die Instandhaltung aus. Hier kommt dem Parameter der Verfügbarkeit hohe Bedeutung zu, da dieser eine direkte Verknüpfung mit der wohlfahrtsökonomischen Betrachtung ermöglicht und somit die Verknüpfung vom Einzelnen zum Ganzen (und umgekehrt) ermöglicht.

Die Thematik kann auch auf Prozessebene betrachtet werden. Nach DIN EN ISO 9000 ist ein Prozess definiert, als „Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet.“²⁹⁶ Dabei kann das vorgesehene Ergebnis auch ein Produkt oder eine Dienstleistung sein. Zudem können sowohl zusammenhängende als auch sich gegenseitig beeinflussende Prozesse als eigenständige Prozesse angesehen werden. Die Prozesse innerhalb von Organisationen zielen auf die Genese eines Mehrwerts ab. Kann die Konformität eines Prozesses nicht validiert werden, so handelt es sich um einen speziellen Prozess.²⁹⁷

²⁹⁶ DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 39.

²⁹⁷ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 39, Anm. 1–5.

Auch die Infrastruktur kann als Prozess verstanden werden. Dabei existieren sowohl ein betriebswirtschaftlicher Prozess als auch ein volkswirtschaftlicher. Der betriebswirtschaftliche Prozess gleicht dabei dem Prozess der Dienstleistung des „Bauens“: Aus Ressourcen, menschlicher wie materieller Natur, als Eingaben, wird durch die Tätigkeit des Bauens das Ergebnis der Infrastruktur erzeugt. Der volkswirtschaftliche Prozess baut darauf auf: Die Infrastruktur, als Ergebnis des betriebswirtschaftlichen Prozesses, dient als Eingabe. Die Verwendung der Infrastruktur stellt dann den Prozess dar (den Leistungsprozess der Funktion, ein Geschäftsprozess des Unternehmens „Infrastruktur“), der zum vorgesehenen Ergebnis, dem wirtschaftlichen Nutzen, führt.

Das einzelwirtschaftliche Objekt, bzw. die Immobilie, kann, konform zum IT-Management, aber auch zu in der DIN 60812 genannten komplexen, reparierbaren Systemen als *System* angesehen werden. Dementsprechend können sich, gleich der zitierten Branchen, Systemkritikalitäten feststellen bzw. Aussagen zu diesen ableiten lassen. Dabei kann (und muss) das System in weitere Unterpunkte aufgegliedert werden, um eine Kritikalitätsanalyse durchführen zu können. Und ebenso kann (und muss) die Immobilie weiter untergliedert betrachtet werden.

Die folgende Abbildung zeigt die Infrastruktur als Verkettung des betriebswirtschaftlichen und des volkswirtschaftlichen Prozesses auf. Dabei entsprechen die Ergebnisse, die Infrastrukturobjekte selbst sowie der volkswirtschaftliche Nutzen genau jenen Wirtschaftlichkeitskriterien, nach denen bereits Jochimsen 1966 fragte.

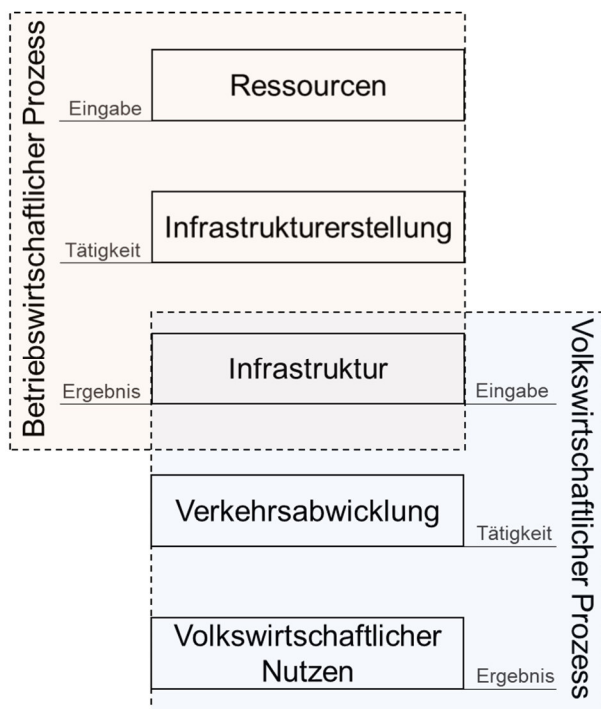


Abbildung 3-22: Wirtschaftliche Prozesskette und resultierender Prozess der Infrastruktur

Mithilfe einer zweistufigen Untersuchung auf sozioökonomischer wie auch auf einzelwirtschaftlicher Ebene kann somit eine wirtschaftliche Betrachtung angestellt werden, welche die von Jochimsen geforderte Rangfolge der Investitionen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene in die Infrastruktur zu leisten imstande ist.

4 Forschungsbedarf

Der Forschungsbedarf lässt sich mit insgesamt 5 Punkten umreißen. Als erstes muss der Lebenszyklus der Infrastruktur begriffen werden. Zusammen mit dem demographischen Wandel lässt sich erkennen, dass der Erhalt, und damit die Instandhaltung, in Zukunft die zentrale Aufgabe darstellen wird. So geht das Wachstum immer weiter zurück, sodass der Großteil der finanziellen Mittel in den Erhalt fließen wird.

Als zweites muss die Belastung der Infrastruktur Berücksichtigung erfahren. So muss es von sich aus klar sein, dass eine höhere Belastung ceteris paribus zu höherer notwendiger Instandhaltung führt. Das eröffnet gleichzeitig die Möglichkeit, bei gegebenen finanziellen Mitteln den Nutzen zu erhöhen, der aus diesen generiert wird, wenn die Allokation zugunsten der Belastung definiert wird.

Aus dieser Wechselwirkung zwischen Kosten und Nutzen geht der dritte Punkt hervor. Dieser definiert die Instandhaltungsstrategie als das zentrale Element zwischen Kosten und Nutzen. Sie ist das Werkzeug, welches letztlich die konkreten finanziellen Flüsse erzeugt und an der gleichzeitig der Nutzen gemessen wird.

Damit lässt sich als vierter Punkt ein klassisches Allokationsproblem definieren. Die Bundesfernstraßen werden aus dem Bundeshaushalt finanziert. Der Finanzierung stehen Steuern, Gebühren und Beiträge gegenüber. Diese spiegeln die Produktionsfaktoren der Volkswirtschaft wider. Der Bundeshaushalt verfügt neben den Bundesfernstraßen noch über diverse andere Bereiche. Möchte man die finanzielle Belastung der Individuen der Volkswirtschaft durch Steuern nicht erhöhen, so ergibt sich die Frage nach der besten Befriedigung der Bedürfnisse der Volkswirtschaft und damit auch nach dem Erhalt der Infrastruktur. Dadurch ergibt sich das Allokationsproblem.

Zuletzt ist der Status quo der Erhaltung der Infrastruktur infrage zu stellen. Derzeit steht die Mess- bzw. Bewertungsgröße „Zustand“ im Mittelpunkt der Erhaltungsentscheidungen bei Bundesfernstraßen. In der Vergangenheit haben kollabierte Infrastrukturobjekte immer wieder Zweifel am Status quo hervorgerufen.

Wenn im Folgenden diese fünf Punkte aufgegriffen werden, dann sollen sie immer vor dem Hintergrund der Bundesfernstraßen betrachtet werden. Dazu soll das Straßenverkehrsnetz beschrieben werden und die Bedeutung, die sich für die Arbeit daraus ergibt. Das deutsche Straßenverkehrsnetz umfasst über 700.000 km. Im Bereich der Bundesfernstraßen entfallen 12.607 km auf die Autobahnen, 38.274 km auf die Bundesstraßen, weitere 13.303 km auf die

peripheren Straßen, die Anschlussstellen und Kreuzungen bilden.²⁹⁸ Das entspricht (ohne Peripherie) 7,24 % des gesamten Straßennetzes. Der Anteil des wirtschaftlichen Verkehrs ist auf diesem Teil, aufgrund des überregionalen Charakters des Güterverkehrs, jedoch am größten.

Den längenmäßig größten Teil am Verkehrsnetz stellen mit 469.493 km die Gemeindestraßen dar. Damit entfällt der größte Teil zudem auf die hierarchisch niedrigste Ebene. Kreisstraßen weisen 94.896 km auf, Landesstraßen 86.900 km.²⁹⁹

Die Bundesfernstraßen besitzen einen Wiederbeschaffungsneuwert in Höhe von 102,04 Mrd. € (exklusive Tunnel und Brücken), die gesamte Verkehrsinfrastruktur einen Wiederbeschaffungsneuwert in Höhe von 896,2 Mrd. € (inklusive Tunnel und Brücken). Der Wiederbeschaffungsneuwert ist dabei der Wiederbeschaffungswert bei einem Abnutzungsvorrat in Höhe von 100 % (neuwertig).³⁰⁰ Dieser entspricht dabei dem Preisstand 2016.

Im Jahr 2017 beträgt der Rückstau der Instandhaltung im Bereich der Verkehrsinfrastruktur 11,93 %. Das entspricht 106,95 Mrd. €. Dabei entfallen auf die Bundesfernstraßen, die Hauptwirtschaftsträger, 11 Mrd. € (das entspricht 10,79 %), 5,32 Mrd. € bei Bundesautobahnen, 5,69 Mrd. € bei Bundesstraßen.³⁰¹ Zum Vergleich: Der Bundeshaushalt wendete 2017 für den Erhalt von Bundesautobahnen 2,11 Mrd. € auf, für Bundesstraßen 1,08 Mrd. €. ³⁰² Dementsprechend beträgt der Rückstau den mehrfachen Jahresetat für Erhaltungsmaßnahmen.

Der Sachverhalt ermöglicht zwei Ansichten: So kann bei ersterer argumentiert werden, dass die Aufwendungen, die den Bundesfernstraßen zufließen, zu gering sind. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass dieser Sachverhalt jedes Jahr von neuem aufgeführt wird. Die Frage, welche Mittel zur Verfügung gestellt werden sollen, wurde in der Vergangenheit schon oft, mit teils salomonischen Antworten, bearbeitet. Die zweite Ansicht umgeht diese Frage und stellt sich den Tatsachen auf praktikablere Art: Wie können die genehmigten Mittel verwendet werden, um den maximalen Nutzen zu erreichen? Hier wird demzufolge das Maximalprinzip abgefragt.

Es mag anfangs schwierig erscheinen, sich von der (naheliegenden) Frage zu distanzieren, warum die Mittel nicht höher ausfallen und wenigstens ansatzweise in den Bereich erhöht werden, der zu einem langfristigen (besser sogar mittelfristigen) Abbau des Rückstaus führt. Jedoch führt

²⁹⁸ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

²⁹⁹ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

³⁰⁰ Vgl. Bertram, Klaus; Brinkmann, Ralph et al.: *Haufe HGB Kommentar: [§§ 238 - 342e HGB]*, Version 1 (Freiburg im Brsg.: Haufe, 2009), S. 610.

³⁰¹ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht, S. 21.

³⁰² Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2017: Einzelplan 12*, zuletzt geprüft am 13.11.2017, S. 16 f.

diese Distanz, zusammen mit dem Ersatz, der Frage nach nutzenmaximierter Verteilung der Mittel, zu einem Ansatz, der letzten Endes von der ersten Frage völlig losgelöst betrachtet werden kann. Er führt zu einem grundsätzlichen Effizienzgewinn und dieser sollte die grundsätzliche Maxime der staatlichen Investitionen sein.

4.1 Zeitliche Auswirkungen der Herstellung auf die zukünftigen Kosten

Mit der Herstellung beginnt der physische Lebenszyklus einer Immobilie. Während des Betriebes nutzt sich diese durch verschiedene Gründe ab. In unbestimmten Intervallen werden Investitionen unternommen, um den Abnutzungsvorrat der Immobilie wieder aufzufüllen. Um den Verlauf der zukünftig zu tätigen Investitionen qualitativ beschreiben zu können, muss in einem ersten Schritt die Summe der Herstellungszeitpunkte des Netzes in einen zeitlichen Zusammenhang gebracht werden. Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung des deutschen Autobahnnetzes. Der Einfachheit halber wird davon ausgegangen, dass sich die Streckenabschnitte der neuen Bundesländer bis 1990 analog zu denen der westdeutschen entwickelt haben.

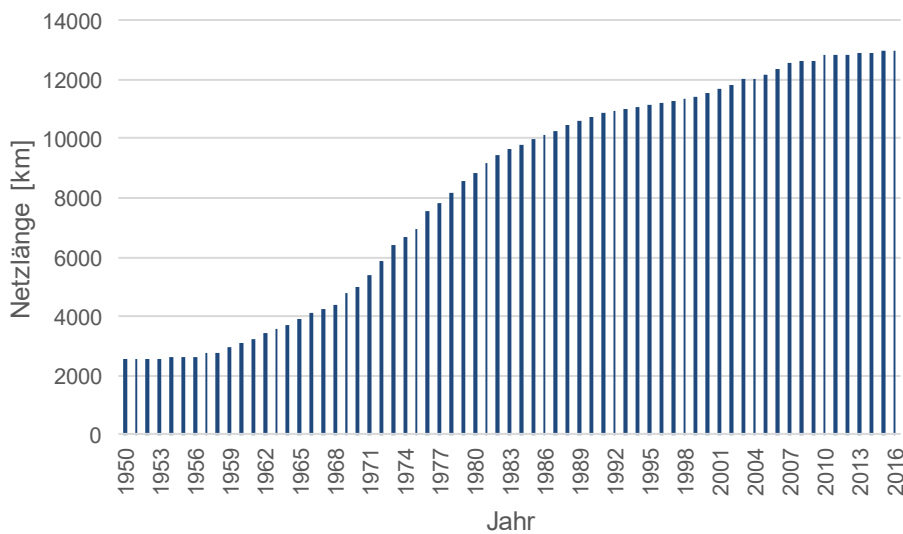


Abbildung 4-1: Entwicklung der deutschen Autobahninfrastruktur ab 1950 (in km)^{303 304}

Die jährliche Änderungsrate dieser Netzinfrastruktur ergibt sich aus dem Neubau an Autobahnstrecke des jeweiligen Betrachtungsjahres. Dieses entspricht dem Herstellungsjahr des jeweiligen Abschnittes. Im Folgenden ist die jährliche Änderung graphisch dargestellt.

³⁰³ Vgl. Deutscher Bundestag: *Straßenbaubericht 2000: Drucksache 14/5064* (Berlin, 2001), S. 129.

³⁰⁴ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Verkehr in Zahlen 2016/17*, 44., aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe (Hamburg: DVV Media Group, 2016), S. 101.

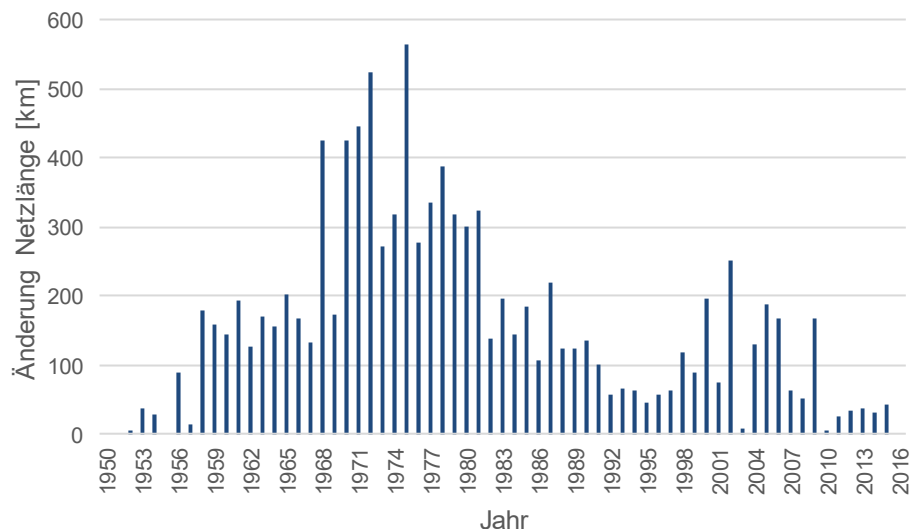


Abbildung 4-2: Jährlicher Zuwachs der deutschen Autobahninfrastruktur ab 1950 (in km)^{305 306}

Um die jährlichen Änderung entsprechend der Dauer ihrer Realisierungen gerechter darzustellen, wird im Folgenden ein gleitender Durchschnitt angewendet. Dies hat zur Folge, dass sich die neuen Strecken über jeweils 4 Jahre verteilen. Bei der qualitativen Betrachtung lassen sich zudem Sachverhalte optisch besser aufzeigen.

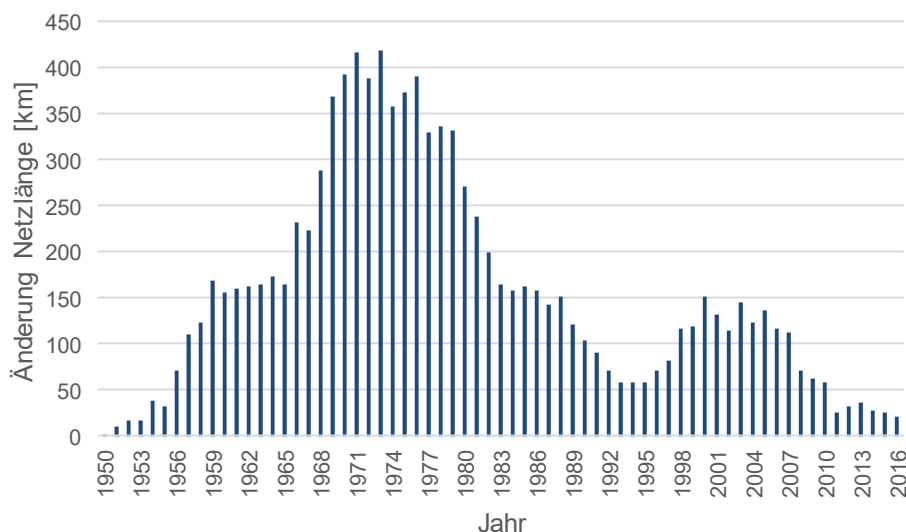


Abbildung 4-3: Gleitender Durchschnitt des jährlichen Zuwachses der deutschen Autobahninfrastruktur ab 1950 (in km)

Man erkennt am Ende der 1960er einen starken Anstieg in der Netzentwicklung. Unterstellt man eine gleichmäßige Abnutzung ohne jegliche Externalitäten, so würde der Streckenabschnitt nach

³⁰⁵ Vgl. Deutscher Bundestag: *Straßenbaubericht 2000: Drucksache 14/5064* (Berlin, 2001), S. 129.

³⁰⁶ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Verkehr in Zahlen 2016/17*, 44., aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe (Hamburg: DVV Media Group, 2016), S. 101.

einem Intervall J seinen Abnutzungsvorrat aufgezehrt haben. Die zukünftigen Investitionskosten entsprechen dann einer identischen Verteilung der Herstellungskosten, multipliziert mit einem Faktor und verschoben um die Länge des Intervalls J. Im folgenden qualitativen Beispiel betrage das Intervall 50 Jahre, die Investitionskosten sollen 75 % der Herstellungskosten betragen.

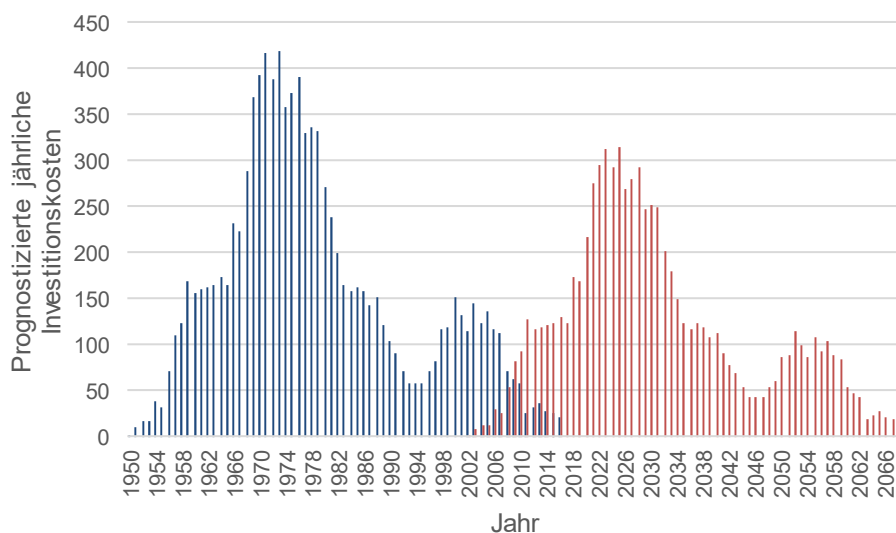


Abbildung 4-4: Jährliche Investitionskosten (qualitativ) mit J = 50

Die Betrachtung der Abbildung veranschaulicht das Auftreten der zukünftigen Investitionskosten. Trotz des Ausschlusses von Externalitäten (dadurch entspricht das Intervall einer „Lebensdauer“) und der Berücksichtigung des gleitenden Durchschnittes sind die Differenzen zwischen den notwendigen Aufwendungen innerhalb des Zeitraumes ihres Auftretens sehr volatil. In der Spitze müssten Aufwendungen bis zu ca. 300 km (Herstellungskosten) getätigt werden, später sinkt der Wert auf unter 50 km. Im Mittel wird ein Äquivalent von 116,7 km jährlich gefordert.

Die Volatilität ist letzten Endes unabhängig davon, ob die ausgeschlossenen Externalitäten Berücksichtigung finden oder nicht. So können sie sowohl eine Verstärkung der Spitzen, als auch eine Abschwächung erzeugen. Jedoch führt dies zu einer Erschwernis der Vorhersage, da das Intervall keiner klassischen „Lebensdauer“ entspricht, die bereits zum Realisierungszeitpunkt abschätzbar ist. Zudem findet in der Realität in den gleichen Jahren Neubau wie Erhalt statt. Beide Kostenarten fallen dann gleichzeitig an und überlagern sich (im Beispiel in den Jahren 2002 bis 2018). Bei einer getrennten Betrachtung spielt dieser Sachverhalt jedoch keine Rolle.

Die Dynamik der Investitionskosten erschwert die Zuweisung von finanziellen Mitteln, da das Erfordernis innerhalb der einzelnen Jahre stark voneinander abweicht. Prinzipiell sind die zukünftigen Investitionskosten eine Funktion in Abhängigkeit vom Herstellungszeitpunkt und damit vom Alter, da „der Zahn der Zeit“ zur Minderung des Abnutzungsvorrates beiträgt.

4.2 Auswirkungen der Belastung auf die zukünftigen Kosten

Unter Berücksichtigung der Externalitäten bei der Abnutzung der Verkehrsinfrastruktur spielt die Belastung eine zentrale Rolle. Sie trägt primär zur materiellen Abnutzung bei. Eine zentrale Messgröße bei der Belastung der Verkehrsinfrastruktur stellt dabei die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) durch Personenkraftwagen (DTV-Kfz) und im Besonderen durch Lastkraftwagen (DTV-SV) dar.

Deutschland, zentraleuropäisch gelegen, stellt ein wichtiges Transitland im internationalen Güterverkehr dar. Gleichzeitig ist aufgrund der polyzentrischen Siedlungsstruktur der nationale Güterverkehr von hoher Bedeutung.

Auf den Bundesfernstraßen nimmt die durchschnittliche Verkehrsstärke kontinuierlich zu. Das bedeutet auch, dass die Abnutzung durch den Verkehr steigt. Prinzipiell muss zwischen der Belastung durch Personenkraftwagen und Lastkraftwagen unterschieden werden, da letztere deutliche höhere Beanspruchungen auf deutlich kleinerer Fläche verursachen.

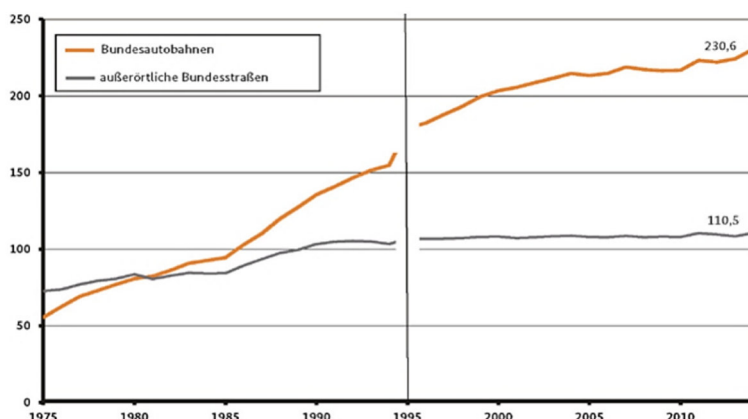


Abbildung 4-5: Jährliche Fahrleistung in Mrd. km bis 2014 (neue Bundesländer ab 1995)³⁰⁷

Die jährliche Fahrleistung des gesamten deutschen Straßennetzes beträgt 2014 740,5 Mrd. km. Davon entfallen 46 % (341,1 Mrd. km) auf die Bundesfernstraßen. Die Autobahnen nehmen dabei mit 230,6 Mrd. km mehr als das Doppelte der Bundesstraßen (110,5 Mrd. km) auf. Im Vergleich zum Vorjahr beträgt die Änderung auf Bundesfernstraßen 2,6 %.³⁰⁸

Zudem erhöhte sich von 2013 auf 2014 die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke auf Bundesautobahnen um 1,1 % auf 48.800 Kfz/24h. Der Schwerlastanteil betrug dabei 14,9 %.³⁰⁹

³⁰⁷ Nach Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2014* (Berlin, 2016), S. 148.

³⁰⁸ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2014* (Berlin, 2016), S. 147.

³⁰⁹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2014* (Berlin, 2016), S. 146.

Besondere Berücksichtigung muss dem Schwerlastverkehr zukommen. Nach der Bundesanstalt für Straßenwesen gelten Fahrzeuge ab 3,5 Tonnen als Schwerverkehr. In der Literatur wird dessen Belastung häufig als „viertes-Potenz-Gesetz“ bezeichnet.³¹⁰ Demzufolge belastet die Achse eines Lastkraftwagens mit der Achslast 7,5 Tonnen die Straße im Vergleich zu einer Achse eines PKW mit einer Achslast von 0,75 Tonnen die Straße um den Faktor 10^4 , was 10.000 entspricht, stärker. Besitzt der Lastkraftwagen 3 Achsen, der Personenkraftwagen dagegen 2, entspricht die Beanspruchung des gesamten Fahrzeugs dem 15.000-fachen.

In Deutschland darf nur überholen, wer mit wesentlich höherer Geschwindigkeit fährt als der zu Überholende.³¹¹ Dieser Regel Folge leistend, schließen sich Überholvorgänge von Lastkraftwagen auf deutschen Bundesautobahnen im Prinzip aus. Das ergibt sich aus der Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h³¹² sowie der zitierten Geschwindigkeitsdifferenz. Für die Abwicklung des Schwerlastverkehrs bedeutet das, dass dieser, entsprechend dem Rechtsfahrgebot und der Tatsache, dass ihm aufgrund der mangelnden Überholerlaubnis nur eine Fahrspur zusteht, auf Autobahnen auf der rechten Fahrspur stattfindet. Dementsprechend ist die aufgeführte erhöhte Belastung durch den Schwerverkehr auf dieser rechten Spur zu finden. Eine Quantifizierung ermöglicht die folgende Abbildung.

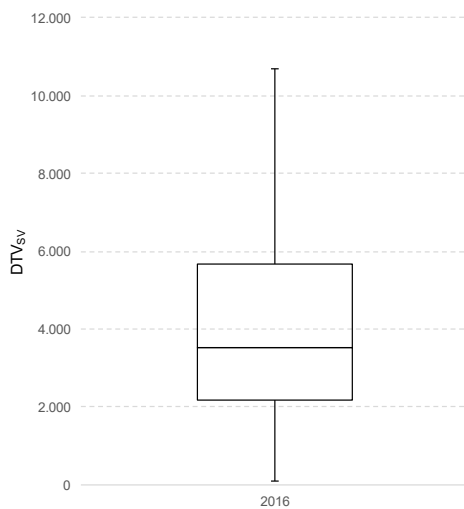


Abbildung 4-6: DTVsv auf deutschen Autobahnen 2016, gemittelt nach Fahrtrichtung³¹³

Die Verteilung zeigt, dass die Verkehrsstärke auf deutschen Autobahnen von 85,5 Kfz/24h bis 10.666 Kfz/24h reicht. Der Zentralwert (Median) liegt bei 3.518 Kfz/24h. Die Hälfte der gemessenen Verkehrsdichten bezieht sich auf das Intervall von 2.157 bis 5.655 Kfz/24h. Die

³¹⁰ Vgl. Stock, Wilfried; Bernecker, Tobias: *Verkehrsökonomie: Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft*, 2., vollst. überarb. Aufl. 2014 (Wiesbaden: Springer Gabler, 2014). doi:10.1007/978-3-658-02308-9, S. 122.

³¹¹ Vgl. *Straßenverkehrsordnung, StVO*, Bundesrepublik Deutschland (01.04.2013), § 5 Abs. 2 Satz 2.

³¹² Vgl. *Straßenverkehrsordnung, StVO*, Bundesrepublik Deutschland (01.04.2013), § 18, Abs 5, 1 a.

³¹³ Auf Grundlage der Daten der Bundesanstalt für Straßenwesen: *Automatische Zählstellen* (2016), zuletzt geprüft am 16.11.2017.

Zählstellen der Werte beziehen sich dabei auf Autobahnen im gesamten Bundesgebiet. Diese Darstellung soll vermitteln, in welcher Größenordnung der Schwerverkehr auf den Bundesautobahnen stattfindet und eine Belastung für das Straßenmaterial darstellt.

Denn die zukünftigen Investitionskosten sind auch eine Funktion in Abhängigkeit von der Belastung, da die materielle Beanspruchung zur Minderung des Abnutzungsvorrates beiträgt. Diese tritt auf der rechten Fahrspur aufgrund des Schwerlastverkehrs verstärkt auf.

4.3 Einfluss der Instandhaltungsstrategie auf die Kosten

Betrachtet man die Soll-Investitionen für den Erhalt sowie die Bedarfsplanmaßnahmen, so lässt sich für die Bundesautobahnen innerhalb der letzten Jahre ein positiver Trend erkennen. Die jährlichen Volumina steigen im Schnitt pro Jahr um 5,5 %. Die notwendigen Mittel einer aktiven Instandhaltung als Funktion der Substanz der Bundesautobahnen verlangt jedoch durchweg höhere Investitionen als die im Bundeshaushalt veranschlagten. Deutlich wird das in der folgenden Abbildung:

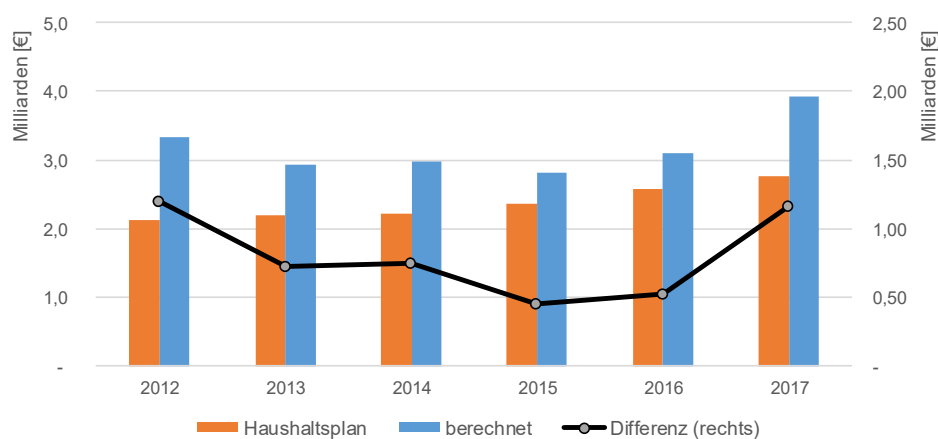


Abbildung 4-7: Vergleich der Soll-Investitionen aus dem Haushaltsplan sowie der berechneten Werte (Bundesautobahnen)^{314 315 316 317 318 319 320}

³¹⁴ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bundeshaushaltsplan 2012 – Einzelplan 12* (Berlin, 2012), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 92 f.

³¹⁵ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bundeshaushaltsplan 2013 – Einzelplan 12* (Berlin, 2013), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 114 f.

³¹⁶ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2014 – Einzelplan 12* (Berlin, 2014), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 115 f. u. 129.

³¹⁷ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2015 – Einzelplan 12* (Berlin, 2015), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 116 f. u. 129 f.

³¹⁸ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2016 – Einzelplan 12* (Berlin, 2016), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 18 f.

³¹⁹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2017 – Einzelplan 12* (Berlin, 2017), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 15 f.

³²⁰ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht.

Es entsteht jährlich eine positive Differenz, was bedeutet, dass die Investitionen zu gering ausfallen. Im Durchschnitt hätten im Betrachtungszeitraum 33,7 % mehr Mittel zur Verfügung gestellt werden müssen als tatsächlich wurden.

Im Bereich der Bundesstraßen sieht das Bild ähnlich aus. So sind auch hier für Erhaltung und Bedarfsplanmaßnahmen zu geringe Volumina veranschlagt. Auch hier zeigt der Trend eine positive Entwicklung mit einem Anstieg von jährlich im Schnitt 11,34 %, jedoch gab es in zwei Folgejahren auch Reduzierungen der Mittel. Die Differenz gegenüber den notwendigen Mitteln der aktiven Instandhaltung ist noch höher als bei den Bundesautobahnen, wie aus der folgenden Abbildung hervorgeht:

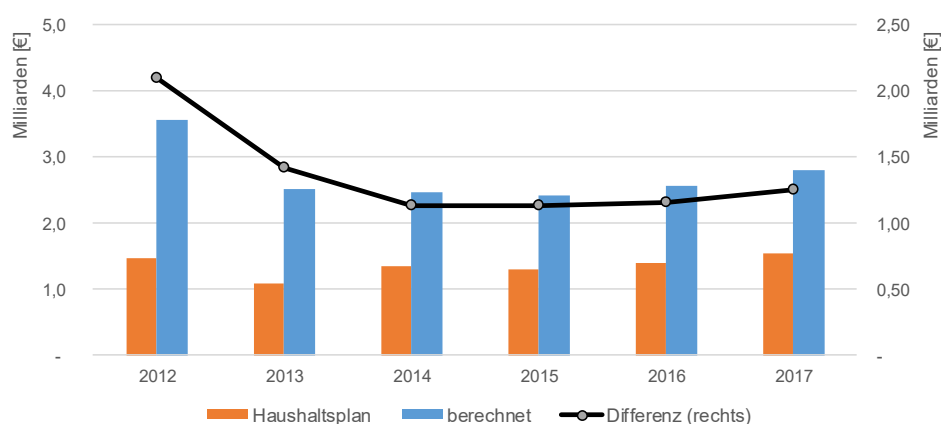


Abbildung 4-8: Vergleich der Soll-Investitionen aus dem Haushaltsplan sowie der berechneten Werte (Bundesstraßen)^{321 322 323 324 325 326 327}

So müssten im Schnitt doppelt so hohe Investitionen veranschlagt werden als tatsächlich wurden (100,1 %). Das entspricht einer Unterfinanzierung, die dreimal so hoch ist wie die im Bereich der Bundesautobahnen, die jedoch hierarchisch betrachtet auch von höherer Wichtigkeit sind.

Betrachtet man die aktive Instandhaltung als Zielstrategie, so ist die Unterfinanzierung sehr deutlich zu erkennen. Die finanziellen Mittel einer Volkswirtschaft sind jedoch knappe Güter.

³²¹ Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bundeshaushaltsplan 2012 – Einzelplan 12* (Berlin, 2012), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 92 f. u. 106.

³²² Vgl. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: *Bundeshaushaltsplan 2013 – Einzelplan 12* (Berlin, 2013), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 114 f. u. 127 f.

³²³ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2014 – Einzelplan 12* (Berlin, 2014), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 115 f. u. 129 f.

³²⁴ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2015 – Einzelplan 12* (Berlin, 2015), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 116 f. u. 130 f.

³²⁵ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2016 – Einzelplan 12* (Berlin, 2016), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 18 f.

³²⁶ Vgl. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: *Bundeshaushaltsplan 2017 – Einzelplan 12* (Berlin, 2017), zuletzt geprüft am 18.12.2017 S. 15 u. 17.

³²⁷ Vgl. Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian et al.: *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase* (München: TU München, 2017), Forschungsbericht.

Letzten Endes müssen die Mittel durch die erhobenen Steuern (auch in Form von (Maut-) Gebühren und/oder Beiträgen) ausgeglichen werden. Allein für die 6 betrachteten Jahre hätten diese Steuern 57,8 % höher ausfallen müssen.

Hier muss deshalb die Frage gestellt werden, ob es dem Individuum, welches letztlich für die Finanzierung aufkommen muss (Steuer- / Gebührenzahler), zugemutet werden kann, dass eine aktive Instandhaltung verlangt wird. Die Mehrkosten sind beträchtlich und gleichen sich dadurch aus, dass (deutlich größere) Restpotentiale der Substanz ungenutzt bleiben, da sie früher erneuert werden und in der Regel nicht zu gleichzeitig höheren Restwerten veräußert werden können. Eine Instandhaltungsstrategie, welche die wirtschaftlichen und objektspezifischen Auswirkungen untersucht, kann hier als Entscheidungshilfe innerhalb der verschiedenen Strategien dienen.

4.4 Allokation der begrenzten Ressourcen

Während die zeitliche Komponente mit ihrer Auswirkung auf die Abnutzung (und damit die Anforderungen an die Betriebsfähigkeit) mit entsprechendem Aufwand und Fachwissen vergleichsweise leicht vorwegnehmbar ist, ist die Komponente der Belastung wesentlich schwieriger zu berücksichtigen. Dabei ist die Änderung der zukünftigen Belastung nicht immer vorhersehbar. Mit dem Blick in die Vergangenheit ist eine Steigerung der Belastung zu erkennen. Selbst wenn man unterstellen würde, dass sich dieser Trend fortführen wird, ist eine exakte Quantifizierung nicht möglich. Stattdessen verzerrt die Funktion der Belastung die Aussage, die sich auf Basis der Altersstruktur anstellen lässt.

Sobald es nun zur Verteilung der finanziellen Mittel kommt, zeigt sich die Problematik der nur unzureichend treffbaren Vorhersagen. Planungen wie der Bundesverkehrswegeplan (wenngleich nur bedingt vergleichbar) verplanen finanzielle Mittel mit einem Horizont bis 2030, zum Veröffentlichungsjahr entspricht das 14 Jahren, die Erarbeitungszeit nicht berücksichtigt.

Zur Sicherung der Betriebsfähigkeit ist neben der Überwachung, wie es bspw. durch die Bundesanstalt für Straßenwesen geschieht, eine entsprechende Reaktion auf die Trends, die sich entwickeln, notwendig. Die Aufwendungen für den Erhalt können dabei teilweise erst kurzfristig zugeordnet werden. Grund hierfür sind die begrenzten Mittel, da ein Erhalt mit unbegrenzten Mitteln deutlich einfacher zu planen wäre. Stattdessen muss darauf geachtet werden, dass die Allokation der Mittel effizient ist. Diese Allokation ist insbesondere zum Zeitpunkt der Planung oder Realisierung nicht möglich, lediglich eine ungefähre, stichtagbezogene Prognose. Die ständige Änderung an Anforderungen und Belastungen an die Infrastrukturobjekte erfordern einen Prozess ständiger Überwachung der Belastungen wie auch der Objekte selbst.

Die Funktion der Belastung ist ein Resultat der volkswirtschaftlichen Bedeutung einer betrachteten Einheit. Die Auswirkungen der Altersstruktur sind dagegen vom Verlauf ehemaliger

Aktivitäten im entsprechenden Sektor abhängig. Sie entsprechen vielmehr einem „Hintergrundrauschen“ aufgrund ihres planbaren Charakters. Möchte man nun, bspw. mit dem Ziel, eine effiziente Allokation der Mittel zum Erhalt anzustellen, die Auswirkungen der Belastung auf ein Objekt vor dem Hintergrund der Bedeutung dieser Belastung selbst untersuchen, so lässt sich dies durch die Analyse der wirtschaftlich bewerteten Ausfallwirkung (was aufbauend auf dem Resultat einer Kritikalitätsanalyse geschieht), bewerkstelligen. Somit lassen sich, ausgehend von wirtschaftlicher Bedeutung und Kritikalität einzelner Infrastrukturobjekte, die (negativen) Folgen für den Infrastrukturträger, bspw. den Verkehr, minimieren (was dem Sinn einer Instandhaltung entspricht), mit dem Zusatz, die knappe Ressource (Geld) möglichst effizient zu verwalten.

4.5 Bewertung der Zustandsgröße als Indikator für Erhaltungsmaßnahmen

Sämtlichen Werken der aktuellen Instandhaltung der Infrastruktur sowie der Infrastrukturforschung ist die Verwendung der Messgröße „Zustand“ gemein. Darüber hinaus bauen viele dieser Werke inhaltlich und methodisch aufeinander auf. Die Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) auf Bundesfernstraßen liefert umfangreiche Informationen, die in die Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen einfließen. Das Pavement Management System wiederum kann die Informationen großflächig und in Verbindung mit weiteren Informationen verwenden.

Bei der Zustandserfassung, -bewertung und -prognose liegt der Fokus auf der Fahrbahnoberfläche und der Fahrbahnsubstanz (anders als bei der (tiefergehenden) Bauwerksprüfung, wie sie bei Brücken stattfindet). Die Zustandserfassung erfolgt oberflächlich. Die Straße wird demzufolge nicht als System bzw. als Ganzes berücksichtigt, sondern nur in zwei, für den Funktionsbetrieb durchaus wichtigen, Teilbereichen. Eine ganzheitliche Betrachtung findet jedoch nicht statt. Gerade im Bereich der Bundesautobahnen ist jedoch das „System Autobahn“ als wesentlich mehr als nur Fahrbahnoberfläche und Fahrbahnsubstanz anzusehen.

Die Zustandserfassung ermöglicht, per definitionem, eine zustandsorientierte Instandhaltung (im Kontext der DIN 13306). Vor dem Hintergrund der einschlägigen Instandhaltungsstrategien findet eine zustandsorientierte bzw. zustandsorientierte, voraussagende Strategie Anwendung. Mit Festlegung auf ein zustandsbasiertes Erhaltungsmanagement findet dementsprechend eine Vorwegnahme der Strategiewahl von Seiten des Managements (der verwaltenden Behörde) statt.

Zudem zeigt sich in der Praxis der Infrastrukturerhaltung, dass die zustandsorientierte Instandhaltung nicht immer zielführend ist. Selbst im Bereich der Brückeninfrastruktur, wo deutlich höhere Ansprüche an die Zustandserfassung gelegt werden als bei der Straßeninfrastruktur, kam es in der Vergangenheit immer wieder zu enormen wirtschaftlichen

Schäden durch mangelhaftes Management (vgl. Rheinbrücke Leverkusen (2012) oder Schiersteiner Brücke (2015)).

Infolgedessen lässt sich eine zustandsorientierte Instandhaltung durchaus als häufig verwendete Lösung bezeichnen, wenngleich mit teilweise nicht ausreichendem Erfolg. Sie orientiert sich am Ist-Zustand der Bausubstanz. Da der Schaden bei Fehlern in der Anwendung direkt vom betroffenen Verkehr abhängt, muss an kritischen Punkten innerhalb der Infrastruktur eine bessere Strategie im Sinne der Verfügbarkeit angestrebt werden (die sich am Soll-Zustand der Substanz orientiert). Nach den Möglichkeiten der DIN 13306 bleibt dafür nur eine vorausbestimmte Instandhaltung.

Die immer wieder auftretenden, plötzlichen Mängel an Infrastrukturobjekten zeigen, dass auch in Deutschland korrektive Instandhaltungsstrategien Anwendung finden. Zwar findet dies offiziell nicht beabsichtigt statt, war aber bereits in der Vergangenheit immer wieder eine adäquate Lösung, wenn die scheinbar bessere Instandhaltungsstrategie versagte.

Eine Zustandserfassung, -bewertung und -prognose ist immer mit Kosten verbunden. Kosten, die sie von anderen Strategien unterscheiden. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Kosten für Prozesse der Zustandserfassung vom Infrastrukturobjekt abhängen und nicht vom Verkehr.

Bei unterschiedlichem Verkehr aber sonst identischer Beschaffenheit sind die Kosten der Zustandsüberwachung gleich. Sehr wohl unterscheiden sich jedoch Kosten-Nutzen-Verhältnisse (unter der berechtigten Annahme, der Nutzen des Verkehrs lasse sich als Funktion in Abhängigkeit von seiner Zusammensetzung beschreiben). In Bezug auf den wirtschaftlichen Nutzen ist die Zustandsüberwachung für (wirtschaftlich) unbedeutendere Strecken dementsprechend teurer als für (wirtschaftlich) bedeutendere.

5 Methodengengese für ein Instandhaltungsmanagement auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte

5.1 Bewertung des Nutzens von Verkehr

Um den Nutzen einzelner Abschnitte zu beschreiben, sind neben den theoretischen Überlegungen praktische Größen notwendig, da die Beschreibung des Nutzens sonst nicht möglich ist. Dazu bedarf es einer Messtechnik, die in Zahl, Verteilung und Informationsgehalt diese Materie beschreibt. Innerhalb dieser müssen demzufolge Messstellen installiert werden, die eine vollständige oder zumindest repräsentative Beschreibung ermöglichen. Parameter, die gemessen werden müssen, sind insbesondere Zusammensetzung (im Verkehr sind das die unterschiedlichen Verkehrsteilnehmer) und Ort (im Verkehr durch die lokale Abgrenzung der Messstellen).

Auf den Bundesfernstraßen erhebt die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) Daten zur Beschreibung des Verkehrsflusses. Diese Daten werden an mehreren hundert Zählpunkten erhoben. Zwar sind diese Daten sehr umfangreich, dennoch reichen sie nicht aus, um alle wünschenswerten Aussagen treffen zu können. Die Annahmen zur Beschreibung müssen so gewählt werden, dass alle zur praktischen Anwendung notwendigen Daten auch vorhanden sind. Diese Zählstellen können als Messstellen für die makroskopische Verkehrsbetrachtung herangezogen werden, da sie die Anforderungen an die spätere Verwendung entweder erfüllen oder solcherart aufbereitet werden können, dass sie die Anforderungen erfüllen.

Aus diesem Grund werden die Methoden sowie das Modell an den deutschen Bundesautobahnen hergeleitet. Da die Theorie nach außen nur von einer abgeschlossenen Menge an Informationen abhängig ist, ist sie, unabhängig von den praktischen Möglichkeiten, auch für sonstige Infrastruktursparten anwendbar. Denn dem Wesen der Materie ist ihr Gehalt im Prinzip egal. Sämtliche Infrastruktur, deren Funktionsbetrieb volkswirtschaftlich mess- und bewertbar ist, kann solcherart behandelt werden. In der Praxis besteht die Herausforderung darin, Informationen, welche diese Möglichkeiten beschreiben, zu erhalten. Während sie für die Bundesfernstraßen durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) frei zugänglich zur Verfügung stehen, müssen sie in anderen Infrastruktursparten oder gar Bereichen ggf. überhaupt erst erhoben werden.

Auf die Anwendung außerhalb der Bundesautobahnen wird daher explizit hingewiesen. So liegt bspw. eine Betrachtung der Eisenbahninfrastruktur nahe. Dazu muss nur ein repräsentatives Netz an Zählstellen über das Schienennetz gelegt werden, bspw. im Fernverkehr. Die Zahl und der Typ der passierenden Züge lässt sich dann ermitteln. Benötigt wird demzufolge eine Datenbasis, welche die Deutsche Bahn AG, zumindest in abstrakter Form, bereits besitzt, wengleich die Qualität ggf. noch nicht ausreichend hoch ist.

5.1.1 Makroskopische Verkehrsbetrachtung

Mithilfe der Kontinuitätsgleichung, einer bestimmten partiellen Differentialgleichung, lassen sich in der Dynamik die Dichten in Abhängigkeit von ihrer räumlichen Änderung beschreiben. Dies lässt sich auch für die Verkehrsdynamik anwenden. Dabei entspricht die summierte Verkehrsdichte der Summe der Verkehrsdichten der einzelnen Elemente in Abhängigkeit von der Zeit, wobei jede Spur einer Straße einem Element entspricht ($\rho_{total}(x, t) = \sum_{i=1}^I \rho_i(x, t)$).³²⁸ Dabei kann selbstverständlich statt einer Straße (ρ_{total}) auch eine individuelle Spur (ρ_i) betrachtet werden.

Zudem gilt ferner die hydromechanische Fluss-Dichte-Beziehung, welche den Fluss Q (der nicht dem Q für Quantität gleichzusetzen ist) als Produkt aus Dichte ρ und Geschwindigkeit V zuordnet. Auch diese Beziehung kann sowohl für eine einzelne Fahrspur ($Q_i(x, t) = \rho_i(x, t) * V_i(x, t)$) als auch für eine Straße als Summe mehrerer Spuren ($Q(x, t) = \rho(x, t) * V(x, t)$), verwendet werden.³²⁹

In der Realität liegen die Einzelfahrzeugdaten in aggregierter Datenform vor. Das heißt, es werden Mittelwerte über bestimmte Zeiträume oder Fahrzeugzahlen gebildet. Die tatsächlichen Einzelfahrzeugdaten gehen dabei im Allgemeinen verloren (die Daten sind demzufolge makroskopisch). Das wirkt sich besonders dort aus, wo räumliche Größen als Grundlage für Aussagen oder Berechnungen verwendet werden. Der Verlust von Längen oder Abständen fällt insbesondere hier ins Gewicht. Denn hier geht die Aussage der Fluss-Dichte-Beziehung verloren. Diese Beziehung wird auch als Fundamentaldiagramm bezeichnet und basiert auf dem Ansatz der Zustandsgleichung des Verkehrsflusses, dass der Verkehrsfluss Q gleich dem Produkt aus der Fahrzeugdichte D und der mittleren Geschwindigkeit v ist.

Das Fundamentaldiagramm hat durchaus seine Berechtigung im Bereich der Planung von Verkehrsabschnitten. Eine Rückwärtsrechnung aus gegebenen, makroskopischen Daten ist jedoch nicht ohne zusätzliche Informationen möglich, da hier die Länge des betrachteten Abschnitts aus den erhobenen Daten nicht abzuleiten ist. Zu- und Abflüsse innerhalb des Verkehrsstroms können zudem nicht festgestellt werden, lediglich die absolute Differenz ist ermittelbar.

Ebenso ist die tatsächliche Geschwindigkeit aus den Messdaten nicht ableitbar. Weder eine Richtgeschwindigkeit noch eine maximal zulässige Geschwindigkeit besitzen eine Aussagekraft, wenn eine erhöhte Verkehrsdichte die Geschwindigkeit verringert, was vor allem bei Einschränkungen des Verkehrs vorliegt.

³²⁸ Vgl. Treiber, Martin; Kesting, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation* (Springer Berlin Heidelberg, 2010), S. 61.

³²⁹ Vgl. Treiber, Martin; Kesting, Arne: *Verkehrsdynamik und -simulation* (Springer Berlin Heidelberg, 2010), S. 62.

5.1.2 Der Leistungsbegriff auf Basis der Realdaten

Der Begriff der Leistung ist physikalisch eindeutig definiert. In der Verkehrstechnik ist die Definition ähnlich der aus der Physik. Da es im Folgenden um die Leistung des Verkehrs geht, soll die Auslegung des Leistungsbegriffs entsprechend kurz geklärt werden.

Leistung ist definiert als Arbeit pro Zeiteinheit. Dies gilt sowohl in der Physik als auch in der Verkehrstechnik. Die Verkehrsarbeit wird im Allgemeinen als Menge der Verkehrselemente, multipliziert mit der zurückgelegten Strecke beschrieben. Alternativ ergibt sich die Arbeit auch aus der Dichte multipliziert mit der Länge, auf der die Dichte auftritt.

Diese Definition hat jedoch einen entscheidenden Nachteil. Eine bestimmte Masse-Längen-Konstellation kann auf einer Zeiteinheit auf verschiedene Arten zustande kommen (so erzeugen 10 mal 10 Tonnen (Lkw) die gleiche Leistung wie 100 mal 1 Tonne (Pkw)).

Den zur Verfügung stehenden Realdaten fehlen zudem Masse- und Längenangaben. Stattdessen müssen diese Dimensionen abstrakt behandelt werden. Statt der Masse eines Elements wird sein Typ verwendet und ggf. weiter gruppiert. Für die Länge wird eine Konstante verwendet. Diese ist immer gleich und kann vernachlässigt werden. Die Leistung im Rahmen der Arbeit entspricht demzufolge einer Menge in Abhängigkeit von ihrem Typ, die einen betrachteten Punkt erfolgreich passiert.

5.1.2.1 Theoretische und tatsächliche Leistungsfähigkeit einer Straße

Um einen Vergleich der verschiedenen Strecken zu ermöglichen und eine Änderung der Verkehrsströme abbilden zu können, bedarf es realistischer Vergleichswerte, die in der Lage sind, den Verkehr entsprechend zu beschreiben. Um die Frage zu beantworten, ob eine Strecke den Verkehr einer anderen Strecke aufnehmen kann, muss die Leistungsfähigkeit der Strecke bekannt sein.

Dazu wird jene Verkehrsmenge untersucht, die eine Strecke unter ihrer gegebenen Geometrie bewältigen kann. Es wird die Anzahl an Fahrzeugen gesucht, welche auf der Strecke maximal abgewickelt werden kann. Die Daten der Zählstellen der BAST werden dazu verwendet. Es werden die durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärken betrachtet. Dabei sind nicht die Werte des gesamten Querschnitts relevant, sondern die des einzelnen Fahrstreifens. Bei den Daten handelt es sich um DTV, was bedeutet, dass die Werte über den Tag addiert sind. Zudem sind es Durchschnittswerte. Anhand der Ganglinien zu den Datensätzen lässt sich ein Maximum in der Verteilung bei 12,5 % ablesen. Das heißt je Zeiteinheit der Ganglinie (das entspricht einer Stunde) können maximal 12,5 % der DTV aufgetreten sein.

Die Werte werden zudem in Abhängigkeit vom Anteil an Schwerlastverkehr dargestellt. Dieser hat eine störende Wirkung auf den Verkehr und reduziert damit die Verkehrsstärken. Durch die folgende Abbildung lässt sich dies verdeutlichen.

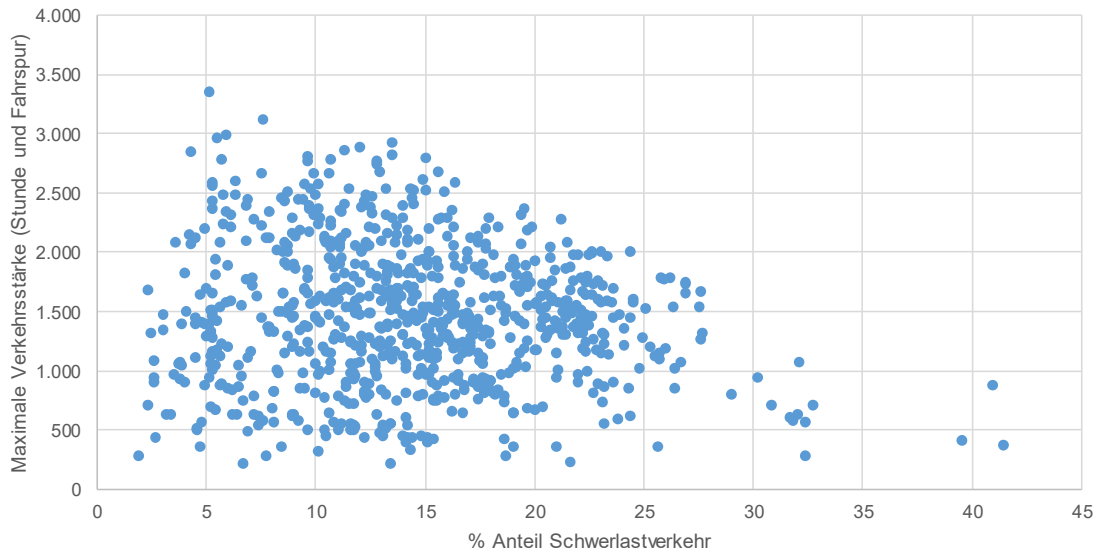


Abbildung 5-1: DTV je Stunde und Fahrspur in Abhängigkeit vom Schwerlastverkehr

Die Verteilung der Punkte liegt, bis auf die 3 Werte mit einem Schwerlastanteil > 35 %, in einem geometrisch begrenzten, dreieckigen, Raum. Die einzelnen Punkte erlauben jedoch keine Aussage über die maximale Leistungsfähigkeit der Fahrspuren. Nur die jeweils höchsten können einem Zustand mit näherungsweise höchster Auslastung angehören. Die folgende Abbildung ergänzt die Punkte um eine qualitative Gerade, die den maximalen Werten näherungsweise zugeordnet werden kann und zudem einen, ebenfalls qualitativen, Puffer berücksichtigt.

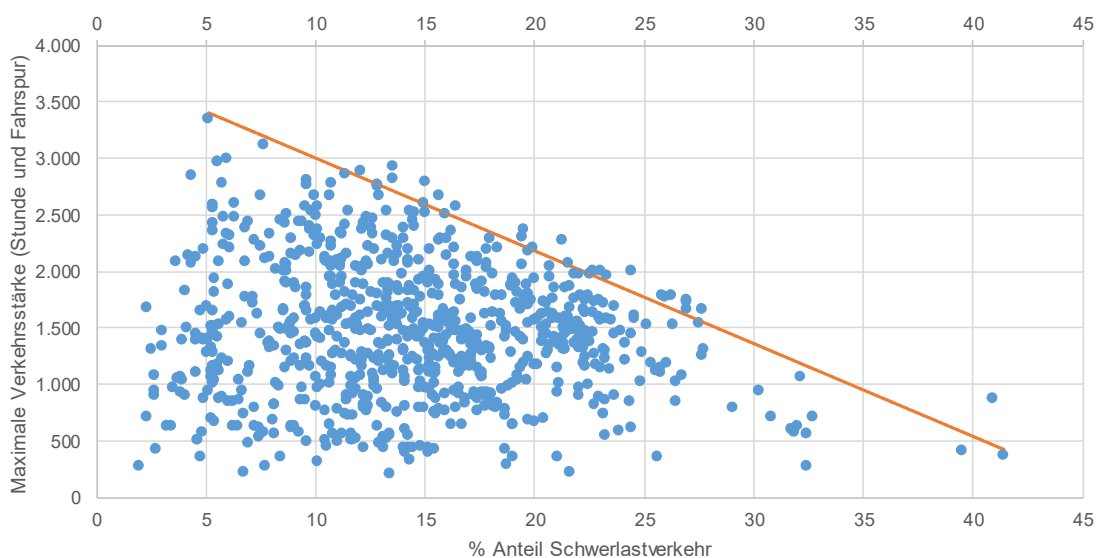


Abbildung 5-2: Qualitative Ausgleichsgerade zu den maximalen Verkehrsstärken

Die dargestellten Werte werden auf den deutschen Autobahnen, unter Annahme korrekter Erfassung, tatsächlich erreicht. Es handelt sich um Werte aus der Praxis. Das ist insofern interessant, als die theoretischen Maximalwerte geringer sind. Selbst ohne Schwerlastverkehr liegt die maximale Verkehrsstärke bei 2.000 Fz/h. Dabei wird eine Kolonne von Fahrzeugen mit konstanter Geschwindigkeit und ohne Beschleunigung unterstellt. Diese halten als Abstand die Hälfte der Geschwindigkeit (in km/h) in Metern ein. Dadurch ergibt sich die Verkehrsstärke zu:

$$q = \frac{v * 10^3}{l + \frac{v}{2}}$$

Formel 5-1: Verkehrsstärke q in Abhängigkeit von Länge und Geschwindigkeit

Dabei bezeichnet q die Verkehrsstärke je Zeiteinheit, hier der Stunde. v ist die Geschwindigkeit in km/h und l die durchschnittliche Länge der Fahrzeuge. Da l eine Konstante ist, wird ihr Einfluss mit steigendem v geringer. Es lässt sich zeigen, dass für den Grenzwert gilt:

$$\lim_{v \rightarrow \infty} (q) = \lim_{v \rightarrow \infty} \left(\frac{v * 10^3}{l + \frac{v}{2}} \right) = 10^3 \lim_{v \rightarrow \infty} \left(\frac{v}{l + \frac{v}{2}} \right) = 10^3 * \frac{v}{\frac{v}{2}} = 2 * 10^3 = 2.000$$

Formel 5-2: Grenzwert der Verkehrsstärke für $v \rightarrow \infty$

Unabhängig von der Fahrzeuglänge beträgt die maximale Verkehrsstärke je Stunde 2.000 Fahrzeuge für hinreichend große Geschwindigkeiten. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf graphisch aufbereitet:

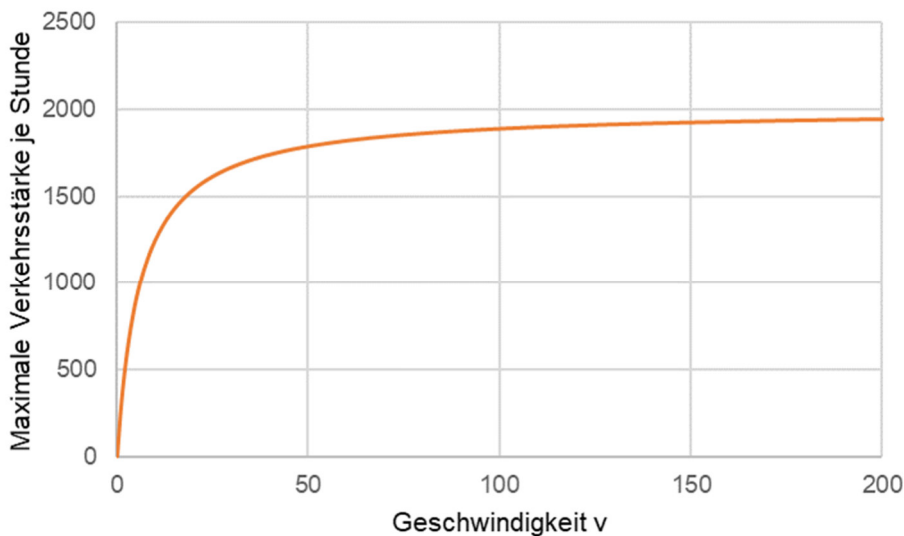


Abbildung 5-3: Darstellung des Verlaufs der maximalen Verkehrsstärke in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

Die theoretische Betrachtung vernachlässigt dabei jedoch einen wesentlichen Aspekt. Sobald ein Fahrzeug die Geschwindigkeit nicht einhält bzw. ändert, kommt es zu einem Stauereignis. Die Stabilität des Systems sinkt mit steigender Geschwindigkeit so stark, dass ein Fahrzeugführer aufgrund seiner reaktiven, gegensteuernden Fahrweise nicht in der Lage ist, diesen Verlauf einzuhalten. Daher sieht das Fundamentaldiagramm auch eine sinkende Verkehrsstärke bei zunehmender Geschwindigkeit jenseits von 70 bis 90 km/h vor.

5.1.2.2 Tatsächliche (erbrachte) Leistung im zeitlichen Verlauf

Es erscheint trivial, dass der Verlauf über eine Zeiteinheit generell nicht als konstant angesehen werden kann. Unterschiedliche Zeiten bringen unterschiedliche Verkehrsstärken hervor. Die BAST verwendet unterschiedliche Ganglinien, die den Verlauf über längere Zeiteinheiten (Tage, Wochen, Monate, Jahr) darstellen. Diese basieren auf Stundenwerten, die je Stunde erhoben werden. Durchschnittliche tägliche Verkehrsstärken, die zentralen Werte der Datensammlungen, beziehen sich auf jeweils ein 24 Stundenintervall.

Die folgende Tabelle zeigt eine Verteilung für eine Montagsganglinie in Abhängigkeit von der Tageszeit. Sie zeigt den offensichtlich nicht gleichverteilten Verlauf. Statt das in jeder Stunde des Tages 1/24 des Verkehrs auftritt, ist das Maximum bei einem Achtel (12,5 %). Ein Verkehrspunkt ist demzufolge in der Lage, eine Leistung von $L = 0,125 * DTV$ zu leisten.

Zeit	Ganglinientyp					
	A	B	C	D	E	F
0–1	0,54 %	0,55 %	1,65 %	0,55 %	0,52 %	0,54 %
1–2	0,31 %	0,29 %	1,23 %	0,33 %	0,31 %	0,33 %
2–3	0,26 %	0,29 %	1,05 %	0,28 %	0,28 %	0,25 %
3–4	0,36 %	0,37 %	1,19 %	0,35 %	0,37 %	0,34 %
4–5	0,92 %	0,93 %	1,87 %	0,95 %	0,98 %	0,44 %
5–6	3,24 %	3,23 %	3,51 %	2,63 %	2,22 %	1,44 %
6–7	8,86 %	7,29 %	5,41 %	5,67 %	4,56 %	3,34 %
7–8	12,51 %	9,78 %	6,20 %	7,99 %	5,74 %	4,64 %
8–9	9,00 %	7,45 %	6,13 %	6,28 %	5,28 %	4,43 %
9–10	6,46 %	6,20 %	5,91 %	5,87 %	5,41 %	4,59 %
10–11	5,23 %	5,56 %	5,79 %	5,79 %	5,72 %	5,09 %
11–12	4,72 %	5,16 %	5,67 %	5,57 %	5,83 %	5,62 %
12–13	4,75 %	5,24 %	5,56 %	5,61 %	5,89 %	5,76 %
13–14	5,21 %	5,64 %	5,57 %	5,89 %	6,00 %	5,95 %
14–15	5,34 %	5,88 %	5,72 %	6,37 %	6,72 %	6,69 %
15–16	5,45 %	6,15 %	5,99 %	6,94 %	7,66 %	8,38 %
16–17	5,99 %	6,91 %	6,34 %	8,26 %	9,17 %	11,33 %
17–18	5,82 %	6,52 %	6,09 %	7,39 %	8,22 %	9,82 %
18–19	4,85 %	5,27 %	5,34 %	5,80 %	6,54 %	7,50 %
19–20	3,74 %	4,00 %	4,23 %	3,95 %	4,53 %	5,05 %

20–21	2,51 %	2,72 %	3,32 %	2,66 %	3,01 %	3,27 %
21–22	1,88 %	2,03 %	2,61 %	2,00 %	2,27 %	2,37 %
22–23	1,35 %	1,52 %	2,09 %	1,52 %	1,76 %	1,91 %
23–24	0,77 %	0,88 %	1,51 %	0,86 %	1,20 %	1,13 %
Max	12,51 %	9,78 %	6,34 %	8,26 %	9,17 %	11,33 %

Tabelle 5-1: Typische Verteilung des Verkehrs in Abhängigkeit vom Ganglinientyp (Montag)

Es ist auffällig, dass auf den untersuchten Straßen scheinbar Verkehrsstärken jenseits der 2.000 Fahrzeuge pro Stunde erreicht werden. Die maximalen Werte der Autobahn 100 in Berlin betragen spurbezogen knapp 26.800 Fahrzeuge. Mit einem Maximum von 12,5 % würde in einer Stunde ein Verkehr von 3.350 Fahrzeugen abgewickelt werden. Bei gleichmäßiger Verteilung über den Tag dagegen nur 1.120 Fahrzeuge. Es ist davon auszugehen, dass der tatsächliche Verkehr dazwischen angesiedelt ist. Ein Vergleich mit den Rohdaten zeigt, dass der maximale Wert 2.219 beträgt, aufgenommen am Dienstag, 19. April 2016 zwischen 8:00 und 9:00 Uhr. Die tatsächlich erbrachte Leistung beträgt hier 111 % der theoretischen Maximalleistung.

Wie eingangs erwähnt, entstammt der Wert einer Zählstelle und ist, sofern die Messung fehlerfrei war, so tatsächlich vorgefallen. Der Anspruch an den Verkehr und die Teilnehmer ist dementsprechend hoch, die Sicherheitsabstände gering. Dieses Verkehrssystem ist wenig robust und kann leicht zu einem Stau oder Ähnlichem führen.

5.1.3 Darstellung eines Netzabschnittes als Graph

Der Verkehr eines Netzes kann als Graph angesehen werden und mittels Graphentheorie beschrieben werden. Ein Verkehrsabschnitt ist dann eine Menge aus Kanten und Knoten. Die Strecken selbst werden dabei durch Kanten dargestellt. Als Knoten werden mindestens die Anfänge und Enden sowie die Kontaktpunkte (Kreuzungen und Anschlüsse) angesehen. Betrachtet man das Netz einer hierarchischen Ebene, bspw. der Bundesautobahnen, so kann jeder Zu- und Abfluss (Auf- /Abfahrten) als Knoten verstanden werden. Dabei ist zu entscheiden, ob diese Berücksichtigung notwendig ist oder eine Vernachlässigung zulässig ist. Wird eine Veränderung im Laufe einer Kante ausgeschlossen, können nur die Knoten Änderungen erwirken, was das primäre Kriterium zur Entscheidung hinsichtlich einer Vernachlässigung darstellt.

Der Graph selbst kann ungerichtet sein, da ein Verkehr zwischen Knoten in beide Richtungen zulässig ist oder gerichtete Mehrfachkanten aufweisen, in dem Fall zwei Kanten für die beiden möglichen Richtungen. Die Kanten sind jedoch gewichtet, da ihnen verschiedene Informationen bzgl. der Strecke, die ihnen zugrunde liegt, aufweisen.

Werden in der Nutzenbetrachtung Strecken oder Netzabschnitte untersucht, so ist dieses grundlegende Verständnis der Annahme eines Graphen fundamental, jedoch sind tiefergreifende graphentheoretische Grundlagen abdingbar. Grundsätzlich unterscheidet sich diese angenommene Darstellungsform jedoch von anderen. Irreführend wäre bspw. eine Annahme eines Netzes in Form eines offenen Wasserleitungsnetzes. Dies würde suggerieren, dass sich das Medium (Wasser bzw. Verkehr) so von alleine verteilt, dass der Druck überall gleich ist. Im Verkehr ist das jedoch nicht der Fall, da jedes Objekt einen fest definierten, wenn auch unbekanntem, Start- und Zielpunkt aufweist.

Nichtsdestotrotz sind Darstellungen von Verkehrsnetzen als Probleme der Graphentheorie sinnvoll. Verschiedene Anbieter bieten diese, meist in Kooperation mit Simulationsprogrammen, kommerziell zu Kauf und Nutzung an. Dies ist vor allem für die theoretische Modellierung sinnvoll, wenn keine expliziten Fälle untersucht werden können oder auch die Wechselwirkung zwischen Verkehrsträgern eine Rolle spielen soll.

Betrachtet man den Ausschnitt eines Verkehrsnetzes mit drei möglichen Wegen, so sieht dieser als Graph entsprechend der folgenden Abbildung aus:

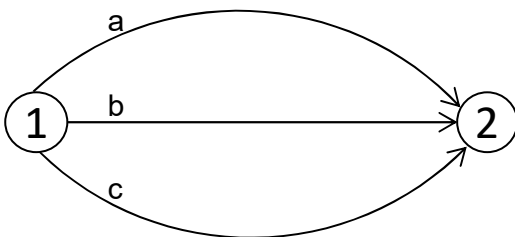


Abbildung 5-4: Einfache Darstellung von drei Alternativen

Der Startpunkt 1 stellt die Quelle dar, der Zielpunkt 2 die Senke des Graphs. Ein Objekt kann sich nun entlang einer der drei Kanten, als die drei möglichen Strecken, bewegen, um von der Quelle zur Senke zu gelangen. Dabei weisen alle drei Strecken einen individuellen, maximalen Fluss auf, den sie aufnehmen können. Zudem weisen sie in der Praxis noch einen aktuellen Fluss auf, der sich auf eine definierte Zeiteinheit bezieht. Der maximale Fluss F des Netzwerks entspricht in dieser Form der Summe der Kapazitäten aus a , b und c .

$$\max F = \sum_{i=a}^c \max F_i$$

Formel 5-3: Maximaler Fluss des Netzwerks

Während der Nutzung des Verkehrsnetzes erzeugen die teilnehmenden Objekte einen aktuellen Fluss, der sich für das Netz als Summe der einzelnen Strecken ergibt.

$$F = \sum_{i=a}^c F_i$$

Formel 5-4: Aktueller Fluss des Netzwerks

Berücksichtigt man die aktuelle Auslastung der Kanten des Netzwerks, so lässt sich das verbleibende Potential des Netzwerks durch Aufsummieren der Differenzen gegenüber dem maximalen Fluss bestimmen.

$$\Delta F = \sum_{i=a}^c \Delta F_i = \sum_{i=a}^v (\max F_i - F_i)$$

Formel 5-5: Verbleibender potentieller Fluss des Netzwerks

Infolge einer Einschränkung ändert sich nun der maximale Fluss dieser Strecke sowie der des gesamten Netzes. Der aktuelle Fluss der Strecken ändert sich zwar, indem Objekte von einer Strecke zur anderen wechseln, die Summe bleibt jedoch gleich, da immer noch die gleichen Objekte von der Quelle zur Senke unterwegs sind. Diese Umverteilung lässt sich beschreiben als:

$$F_{ante} = \sum_{i=a}^c F_{i,ante} \quad \neq \quad F_{post} = \sum_{i=a}^c F_{i,post}$$

Formel 5-6: Zusammenhang des aktuellen Flusses innerhalb des Netzwerks

$$\max F_{ante} - F(\text{Einschränkung}) = \max F_{post}$$

Formel 5-7: Zusammenhang des maximalen Flusses innerhalb des Netzwerks

Zu Störungen für den aktuellen Fluss kommt es demnach nur dann, wenn der aktuelle Fluss (ante = post) des Netzes größer wird als der maximale Fluss (post). Geschieht es nur für eine Strecke, so könnte eine andere den Fluss aufnehmen, daher muss das Netz als solches betrachtet werden.

Für Betrachtungen der Bundesfernstraßen sind bei der Anwendung der genannten Formeln entsprechend die Querschnitte und Verkehrsstärken notwendig. Die Querschnitte, die von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) festgelegt sind, weisen maximale Verkehrsstärken auf, bis zu denen der reibungslose Verkehr gewährleistet ist. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) erhebt die durchschnittlichen Verkehrsstärken der Strecken. Somit sind die geschilderten Betrachtungen und die Anwendung der Formeln möglich.

5.1.4 Herleitung einer Kenngröße zur Verkehrsnutzenbeschreibung

Während die Leistung bisher auf Basis der Realdaten als punktbezogene Größe verwendet wurde, soll sie nun unter theoretischen Aspekten als längenbezogene Größe betrachtet werden. Der Nutzen eines Verkehrsabschnittes soll als repräsentative Größe beschrieben werden, die einen Vergleich zu anderen Fällen ermöglicht. Dabei ist weniger das theoretische Potential des Abschnittes relevant. Dieser wäre der maximal aufnehmbare Nutzen. Stattdessen ist der tatsächlich erbrachte Nutzen von Belang. Der Nutzen soll als eine Menge quantifiziert werden. Diese ist als Funktion des Abschnittes über einen bestimmten Betrachtungszeitraum zu sehen. Er bildet die Fahrzeuge ab, die ihn passieren sowie deren Geschwindigkeit.

$$\text{Nutzen}(t) = \text{Zeitmenge}(Q_t) = Q * l * v^{-1}$$

Formel 5-8: Nutzen in Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung

Der Quotient aus Länge l und Geschwindigkeit v beschreibt die Verweildauer des Fahrzeugs innerhalb des betrachteten Abschnittes. Multipliziert mit der Menge je Zeiteinheit Q , ergibt sich die Zeitmenge, welche die Menge der betrachteten Fahrzeuge erzeugt. Möchte man unterschiedlich schnelle Fahrzeuggruppen betrachten, so ist eine getrennte Betrachtung mit anschließender Addition nötig. Diese ergibt sich zu

$$\text{Nutzen}(t) = \text{Zeitmenge}(Q_t) = \sum_{i=1}^n Q_i * l * v_i^{-1}$$

Formel 5-9: Nutzen mehrerer Abschnitte in Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung

Der Nutzen ermittelt sich hierbei in Abhängigkeit von den eingegebenen Parametern zu Fahrzeuge mal Zeiteinheit der Geschwindigkeit pro Zeiteinheit der Menge. Sind beide Zeiteinheiten gleich, bspw. bei einer Geschwindigkeit in Kilometern pro Stunde und einer Verkehrsstärke in Fahrzeugen pro Stunde, so verschwinden beide Zeiteinheiten und die Zeitmenge entspricht den Äquivalenzfahrzeugen (Fzh/h).

Der Nutzen, der auf diese Art und Weise abgebildet wird, ignoriert den wirtschaftlichen Sinn des Fahrzeuges. Da der Nutzen langsamer Fahrzeuge gegenüber dem schnelleren abgewertet wird, kann bspw. die Dringlichkeit einer Fahrt nicht erfasst werden. Wesentlich wichtiger erscheint die Unterscheidung des Schwerlastverkehrs gegenüber dem motorisierten Individualverkehr, wenn man unterstellt, dass die Waren des Schwerlastverkehrs ggf. einen signifikant höheren wirtschaftlichen Nutzen erzeugen.

Um diese Problematik zu lösen, empfiehlt es sich, den unterschiedlichen Verkehrsgruppen Leistungsfaktoren zuzuordnen, welche ihren wirtschaftlichen Sinn abbilden. Dazu wird die gegebene Formel um diese Faktoren erweitert, der Nutzen dementsprechend in Abhängigkeit vom Verkehr selbst ausgedrückt.

$$\text{Nutzen}(Q_t) = \text{bewertete Zeitmenge}(Qk_t) = \sum_{i=1}^n Q_i * l * v_i^{-1} * k_i$$

Formel 5-10: Bewerteter Nutzen mehrerer Abschnitte in Abhängigkeit von der zeitlichen Betrachtung

Die Zeitmenge kann zudem verwendet werden, um mittels Multiplikation mit Kostenkennwerten monetäre Aussagen zu treffen. So können bspw. Betriebskostenkennwerte oder Ähnliches angewendet werden, die in Abhängigkeit von der Zeit angegeben werden.

5.1.4.1 Herleitung der auftretenden Zustände/Fälle

Ein betrachteter Abschnitt kann auch als Summe mehrerer Abschnitte abgebildet werden. Daher können Abschnitte beliebig kleiner Größe getrennt untersucht und anschließend mittels Addition verknüpft werden. Dies ist in einigen Kombinationsmöglichkeiten notwendig, wenn sich Einschränkungen eines Abschnittes auf weitere Abschnitte ausweiten.

Werden die beiden Parameter *Länge pro Zeit* (Geschwindigkeit) und *Menge pro Zeit* (Verkehrsstärke) als veränderliche angenommen, so ist eine Unterscheidung in 4 Fälle möglich. In den ursprünglichen Fall, die beiden Fälle, in denen je eine Variable beeinflusst wird und den Fall, in dem beide zugleich verändert werden, demzufolge eine Überlagerung der beiden entsprechenden anderen Fälle.

Fall	Δv [km/h]	ΔM [Kfz/ZE]
Fall 0	x	x
Fall 1	✓	x
Fall 2	x	✓
Fall 3	✓	✓

Tabelle 5-2: Unterscheidung der Veränderlichen in Abhängigkeit von den Fällen

5.1.4.1.1 Fall 0

Als Fall 0 wird der Zustand beschrieben, in dem der betrachtete Abschnitt keinen äußeren Einfluss erfährt. Menge, Art und Geschwindigkeit der Fahrzeuge sind ungestört. Dieser Fall ist jener, der mit den anderen Fällen verglichen wird und mit dessen Differenz das Nutzendefizit ermittelt wird.

5.1.4.1.2 Fall 1 – geänderte Geschwindigkeit

Ändert sich die Geschwindigkeit im betrachteten Abschnitt, etwa durch eine Geschwindigkeitsbeschränkung, so reduziert sich auch der Nutzen, den der Streckenabschnitt generiert. Dabei muss sich die Menge an aufgenommenem Verkehr pro Zeiteinheit nicht ändern. Immer noch verlassen gleich viele Fahrzeuge den Abschnitt mit der gleichen Geschwindigkeit, wie sie ihn betreten bzw. befahren haben.

Durch ein entsprechendes Vorzeichen kann neben der Geschwindigkeitsbeschränkung auch eine Erhöhung abgebildet werden.

5.1.4.1.3 Fall 2 – geänderte Menge

Ändert sich die Anzahl der Fahrzeuge einer Gruppe, so ändert sich auch der Nutzen. Die Änderung der Anzahl kann dabei, bspw. im Falle einer Sperrung für diese Gruppe, bis zu 100 % betragen. Die Fahrzeuge, die von dem betrachteten Abschnitt nicht mehr aufgenommen werden können, werden dann über alternative Wege abgebildet, für die ebenfalls mindestens der gleiche Fall zutrifft.

Selbstverständlich kann durch ein entsprechendes Vorzeichen sowohl eine Verminderung, als auch eine Erhöhung abgebildet werden, denn nur so ist die Aufnahme des Verkehrs auf Alternativen möglich.

5.1.4.1.4 Fall 3 – geänderte Geschwindigkeit und Menge

Im letzten Fall werden die beiden vorherigen überlagert. Der Fall lässt sich somit als Addition der beiden verstehen. Hier findet eine Änderung sowohl der Geschwindigkeit als auch der Verkehrsstärke statt. Auch hier müssen Alternativstrecken berücksichtigt werden, auf welche die Änderung des Verkehrsflusses der Ursprungstrecke wirkt. Aufgrund der Natur der Überlagerung handelt es sich bei Fall 3 um eine Verallgemeinerung, wodurch eine Fallunterscheidung weiter nicht notwendig ist.

5.1.4.2 Formelzusammenstellungen samt Differenzen

Für die aufgeführten vier Fälle lassen sich nun analog zu Formel 5-8 die Nutzen bzw. deren Defizite beschreiben. Für den Fall 0 tritt noch kein Unterschied auf, da eine Vergleichbarkeit nicht möglich ist.

Für Fall 1 ergibt sich, bei geänderter Geschwindigkeit bei gleicher Strecke, der verlorene Nutzen bei Herabsetzung der Geschwindigkeit um Δv als Differenz zwischen der Soll-Geschwindigkeit v_s und der Ist-Geschwindigkeit v_i zu

$$\begin{aligned}\Delta \text{Nutzen}(t) &= \Delta \text{Zeitmenge}(Q_t) = \sum_{i=1}^n Q_i * l * v_{Ii}^{-1} - \sum_{i=1}^n Q_i * l * v_{Si}^{-1} \\ &= \sum_{i=1}^n Q_i * l * (v_{Ii}^{-1} - v_{Si}^{-1}) = \sum_{i=1}^n Q_i * l * \Delta v_i^{-1}\end{aligned}$$

Formel 5-11: Verlust an Nutzen bei Fall 1

Für Fall 2 ergibt sich eine Änderung der Menge bei gleichbleibender Geschwindigkeit. Das bedeutet für die Differenz des Nutzens bei der gegebenen Ist-Menge Q_i und der gegebenen Soll-Menge Q_s und daraus resultierendem ΔQ :

$$\begin{aligned}\Delta \text{Nutzen}(t) &= \Delta \text{Zeitmenge}(Q_t) = \sum_{i=1}^n Q_{Ii} * l * v_i^{-1} - \sum_{i=1}^n Q_{Si} * l * v_i^{-1} \\ &= \sum_{i=1}^n (Q_{Ii} - Q_{Si}) * l * v_i^{-1} = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i * l * v_i^{-1}\end{aligned}$$

Formel 5-12: Verlust an Nutzen bei Fall 2

Es muss beachtet werden, dass im Gegensatz zur Geschwindigkeit, wo eine Verringerung einen positiven Nutzenverlust erzeugt, eine Verringerung der Menge zu einer Reduzierung der Zeitmenge führt. Entgegen der intuitiven Interpretationsweise führt eine positive Nutzendifferenz zu einem Schaden, da eine geringere Zeitmenge als vorteilhaft angesehen wird. Die Nutzendifferenz ist hier negativ, es handelt sich demzufolge um einen Nutzengewinn. Letzten Endes ist dieser Gewinn jedoch kleiner als der Verlust, den die Mengenänderung auf einer alternativen Strecke erzeugt, solange die Akteure effizient rational handeln und versuchen, ihre Fahrzeiten zu minimieren.

Fall 3 stellt dem Prinzip nach eine Überlagerung der Fälle 1 und 2 dar. Dieser Fall vereint beide Fälle und sollte immer angewendet werden, da bei den Fällen 1 und 2 lediglich eine Differenz gegen Null gebildet wird. Bei Fall 3 handelt es sich um die allgemeinste Darstellung.

$$\begin{aligned}\Delta \text{Nutzen}(t) &= \Delta \text{Zeitmenge}(Q_t) = \sum_{i=1}^n Q_i * l * \Delta v_i^{-1} \circ \sum_{i=1}^n \Delta Q_i * l * v_i^{-1} \\ &= \sum_{i=1}^n l * (Q_{Ii} v_{Ii}^{-1} - Q_{Si} v_{Si}^{-1})\end{aligned}$$

Formel 5-13: Verlust an Nutzen bei Fall 3

Der Nutzen bezieht sich bisher auf einen Straßenabschnitt, der von Fahrzeugen unterschiedlicher Gruppen befahren wird. Da bei einer Änderung der Menge Q die Fahrzeuge nicht einfach verschwinden, sondern über alternative Abschnitte geführt werden, muss auch die Länge l mit einem Index versehen werden, der die unterschiedlichen Alternativen, zusammen mit der Ursprungsstrecke als Netzausschnitt L abbildet.

$$\Delta \text{Nutzen}(t; L) = \Delta \text{Zeitmenge}(Q_t; L) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_j * (Q_{Ii} v_{Ii}^{-1} - Q_{Si} v_{Si}^{-1})$$

Formel 5-14: Verlust an Nutzen bei einer Netzbetrachtung

Anschließend kann wieder die Bewertung mit dem Bewertungsparameter k erfolgen, der jeder Menge eine Wertung zuordnet.

$$\Delta \text{bewerteter Nutzen}(t; L) = \Delta \text{bewertete Zeitmenge}(Q_t; L) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n l_j * (Q_{li} v_{li}^{-1} - Q_{si} v_{si}^{-1}) * k_i$$

Formel 5-15: Bewerteter Verlust an Nutzen bei einer Netzbetrachtung

Aufgrund der Trivialbeziehung $t = l * v^{-1}$, welche die Länge mit der Geschwindigkeit ins Verhältnis setzt, ergibt sich als Produkt das Zeitmaß. Ignoriert man die Geschwindigkeit, handelt es sich um ein Längenmaß. Somit kann, durch Auslassen der Berücksichtigung der Geschwindigkeit, die zusätzliche Befahrungsdauer auch als zusätzliche Menge an überfahrener Länge ausgedrückt werden. Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang auf:

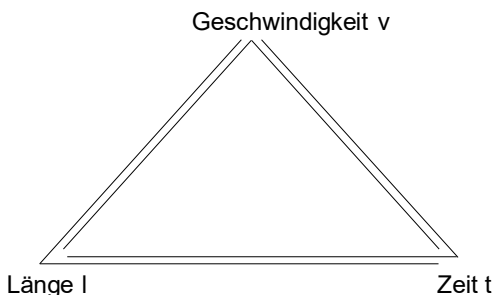


Abbildung 5-5: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Zeit und Länge

Sind von den drei Parametern zwei gegeben, so lässt sich der resultierende ermitteln. Dieser Sachverhalt lässt sich bei der Bedienung der unterschiedlichen Nutzenfaktoren nutzen, da diese auf diesen drei Parametern aufbauen.

5.1.5 Unterscheidung der zeitlichen Aufkommen

Die Verkehrsstärke eines betrachteten Streckenabschnitts ist über die Zeit gesehen nicht konstant. Aus diesem Grund müssen bei der Betrachtung Zeitintervalle gebildet werden. Die Frage nach der Wahl dieser Intervalle ist insofern von großer Relevanz, als immer nur Zeitfenster entsprechend der Intervalle untersucht werden können. Es ist weiter zu unterscheiden, wie diese Intervalle im theoretischen Idealfall aussehen sollten und was vor dem praktischen Hintergrund überhaupt möglich ist.

Betrachtet man einen Zeitabschnitt, der aus mindestens einem Intervall besteht und der durch eine Einschränkung abgebildet wird, lassen sich zwei grundsätzliche Fragen beantworten:

Wie hoch ist der aufgelaufene bzw. addierten Schaden (Nutzendifferenz) und welchen Schaden (Nutzendifferenz) erzeugt die Behebung der Einschränkung. Denn die Maßnahme, die der

Behebung der Einschränkung dient, kann für ihre Dauer eine Verstärkung der Einschränkung hervorrufen. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, die Maßnahme in eine verkehrsärmere Zeit zu verlegen, dafür eine verlängerte Dauer der Einschränkung in Kauf zu nehmen. Betrachtet man lediglich den wirtschaftlichen Schaden, lässt sich der Grenzwert darstellen als:

zusätzliches Nutzendefizit durch Aufschiebung = zusätzliches Nutzendefizit der Maßnahme

$$\int_a^b Q(t)_E * l_E * \Delta v_E^{-1} dt = \int_b^c Q(t)_M * l_M * \Delta v_M^{-1} dt$$

Formel 5-16: Auswirkung des Zeitpunkts einer Maßnahme auf den Nutzen

Auf der einen Seite wird das Nutzendefizit durch die Aufschiebung der Maßnahme bestimmt. Dabei wird das Integral über das Intervall a bis b berechnet, wobei a der früheste Zeitpunkt des Maßnahmenbeginns darstellt, b den tatsächlichen Beginn. Es wird dann die Menge der Verkehrselemente über diesen Zeitraum betrachtet. Da durch eine temporäre Verkehrsumleitung die Länge veränderbar ist, wird auch diese mit einem Index versehen.

Auf der anderen Seite wird das Nutzendefizit bestimmt, welches durch die Ausführung der Maßnahme zum tatsächlichen Zeitpunkt generiert wird (im Intervall b bis c, mit c als dem tatsächlichen Ende der Maßnahme).

5.1.5.1 Theoretische Unterscheidungsmöglichkeiten

Im idealen Fall würden die Verkehrselemente über den zeitlichen Verlauf vollständig abgebildet werden. Dadurch würde ein repräsentatives Bild über die Verkehrsstärke ermöglicht. Dadurch wäre es zudem möglich, Nutzensaussagen präzise zu tätigen und exakte Werte darzustellen.

Dazu würden Ganglinien erfasst, welche die Messwerte in zeitlicher Reihenfolge abbilden. Der Gang entspricht in diesem Fall der Belastung des betrachteten Abschnittes. Diese Darstellung würde sämtliche Schwankungen des Verkehrs abbilden. Neben der täglichen Verkehrsstärke wird auf diese Weise auch die Verteilung über Wochen und Monate untersucht. Auch die Auswirkungen von Wochenenden und Ferienzeiten lassen sich so berücksichtigen.

Effekte, welche die Verkehrsstärke direkt beeinflussen, würden auf diese Weise ebenso berücksichtigt werden können wie indirekte. Gerade indirekte Effekte, wie Beeinträchtigungen anderer Strecken oder Verkehrsträger erfordern dabei eine aufmerksame Betrachtung, da es hier zu Wechselwirkungen kommen kann, die leicht übersehen werden können.

Dadurch entsteht letztlich eine Vielzahl von verschiedenen Ganglinien, von denen jede für sich, mittels der geschilderten Formeln untersucht werden muss. Die Ergebnisse werden anschließend

überlagert, was zur, unter den gegebenen Umständen, maximal genauesten Erfassungsart führen würde.

Mit der Verkehrsstärke als Mengenfunktion $Q(t)$ können die gegebenen Formeln problemlos verwendet werden, da es irrelevant ist, ob $Q(t)$ eine Funktion im eigentlichen Sinne oder eine Konstante ist.

5.1.5.2 Praktische Umsetzungsmöglichkeiten

Die Bundesanstalt für Straßenwesen greift die Ganglinien in ihren Berichten zur Verkehrsentwicklung auf. Sie verwendet sie zur Beschreibung des Verlaufs des zeitlichen Verkehrsaufkommens auf Basis der Daten ihrer Zählstellen.

Die Ganglinien der BAST gelten jedoch nur in der sogenannten Normalzeit. Im Jahr 2014 handelte es sich dabei um 69 Tage, die weitgehend von Ferien, Feiertagen und winterlicher Witterung unbeeinflusst waren. Weiter unterscheiden sie den Kfz-Verkehr nicht.³³⁰ Darüber hinaus werden die Ganglinien kategorisiert. So sind je nach Intervall 6 bis 8 unterschiedliche, qualitative Ganglinien verfügbar.

In Bezug auf die Intervalle unterscheidet die BAST zwischen Tagesganglinien, die stündliche Werte richtungsgetreunt aufnehmen und Ganglinien für Montag, Dienstag bis Donnerstag, Freitag, Samstag und Sonntag liefern, Wochenganglinien, die tägliche Werte richtungsgetreunt aufnehmen und Jahresganglinien, die wöchentliche Werte aufnehmen.³³¹

Im Folgenden sind die Tagesganglinien für den Montag dargestellt. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, den Verkehr nicht nur mit den DTV, welche den ganzen Tag gemittelt darstellen, zu arbeiten, sondern den tatsächlichen Verlauf darzustellen.

³³⁰ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*, mit der Unterstützung von Arnd Fitschen und Hartwig Nordmann (Bergisch Gladbach, 2016), S. 17.

³³¹ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*, mit der Unterstützung von Arnd Fitschen und Hartwig Nordmann (Bergisch Gladbach, 2016), S. 18 ff.

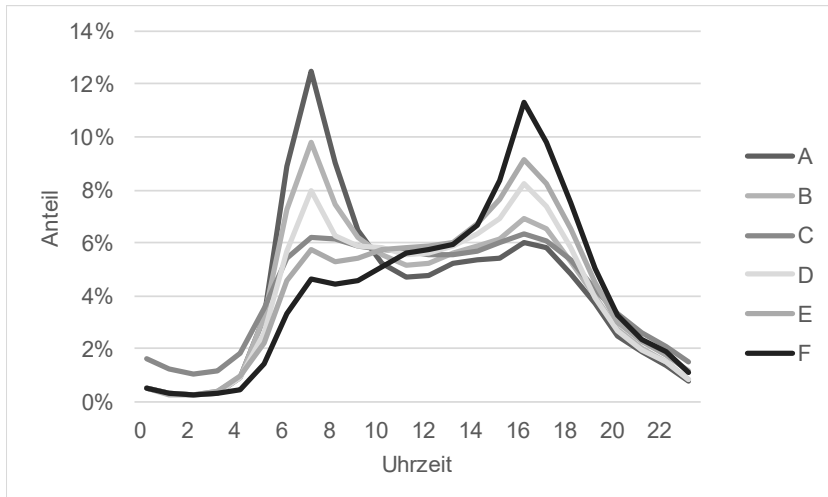


Abbildung 5-6: Tagesganglinienten des Kfz-Verkehrs – Montag³³²

5.1.5.3 Bedeutung des Zeitpunktes von Maßnahmen

Im Folgenden sei der Verlauf der durchschnittlichen Verkehrsstärke innerhalb einer Woche gegeben. Der Verkehr weist am Montag eine Morgenspitze bei kleinerer Nachmittagspitze auf. Dienstag bis Donnerstag weist er eine relativ gleich verteilte Doppelspitze auf, am Freitag ein breites Maximum am Nachmittag. Der Samstag ist der verkehrsärmste Tag, mit einer ausgeglichenen Belastung, am Sonntag steigt er im Tagesverlauf zu einer ausgeprägten Abendspitze. Der Verkehr ist dabei konform gewählt mit Erhebungen der BASt.

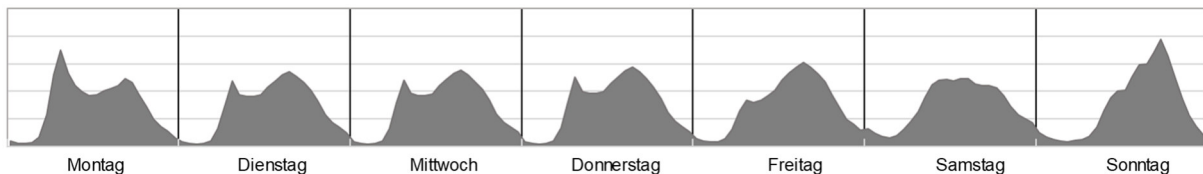


Abbildung 5-7: Verkehrsentwicklung über eine Woche

Die Strecke hat sich nun so etabliert, dass es während der Montagsspitze und während der Sonntagsspitze zu stockendem Verkehr kommt, da sie für diese Spitzen nicht ausgelegt ist. In der restlichen Zeit ist das Verkehrsvorkommen von der Strecke aufnehmbar.

Nach etwa 3,25 Tagen soll es nun in den frühen Morgenstunden zu einem Vorfall kommen, infolgedessen der Verkehr eingeschränkt wird. Der Vorfall ereignet sich statistisch gesehen während die Verkehrsstärke ansteigt. Eine Spur muss für den Verkehr gesperrt werden. Die Behebung des Schadens mitsamt der Verkehrssicherung dauert 12 Stunden und erfordert die Sperrung der benachbarten Spur.

³³² Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*, mit der Unterstützung von Arnd Fitschen und Hartwig Nordmann (Bergisch Gladbach, 2016), S. 18.

Es lassen sich nun prinzipiell zwei Möglichkeiten untersuchen. Entweder wird der Schaden direkt behoben oder mit der Behebung des Schadens wird gewartet, bis der Verkehr eine Behebung in einem besseren Maße zulässt.

Bei sofortiger Behebung fällt der Zeitraum genau in die Hauptverkehrszeit, wodurch der Verkehr stark eingeschränkt wird, wie die folgende Abbildung zeigt.

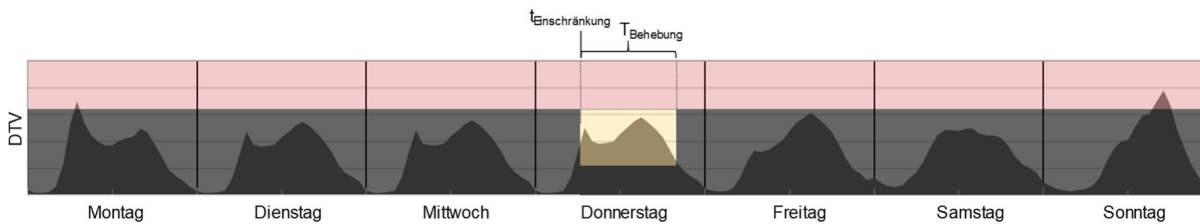


Abbildung 5-8: Darstellung der Einschränkung bei sofortiger Behebung

Wird stattdessen mit der Behebung bis zur verkehrsarmen Nacht von Samstag auf Sonntag gewartet, so wird der Verkehr weniger gestört. Während der aufgeschobenen Zeit von 2,5 Tagen entsteht jedoch eine zusätzliche Behinderung des Verkehrs.

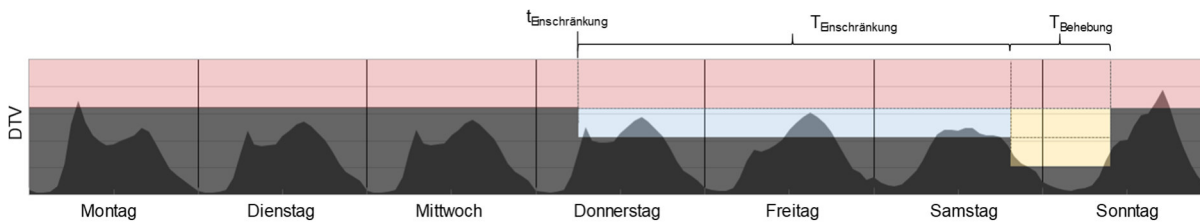


Abbildung 5-9: Darstellung der Einschränkung bei aufgeschobener Behebung

Die Summe der Auswirkungen des Schadens (graue Fläche vor blauer/gelber Fläche) ist im zweiten Fall geringer als im ersten. Das Aufschieben sorgt in diesem Fall für einen besseren Verkehrsfluss als die sofortige Behebung und somit für einen geringeren volkswirtschaftlichen Schaden.

Dabei werden natürlich die evtl. höheren Kosten aufgrund der Nacharbeit vernachlässigt. Der Nutzen ist höher, dass Nutzen-Kosten-Verhältnis kann dagegen schlechter sein. Ebenso handelt es sich um ein sehr konkretes Beispiel, in der Realität sind die Einschränkungen in der Regel komplexer. Dennoch zeigt sich die Bedeutung der *Formel 5-16: Auswirkung des Zeitpunkts einer Maßnahme auf den Nutzen* auf den gezeigten Sachverhalt. Mit den Berechnungsarten und -vorschriften in diesem Kapitel kann der Zeitpunkt einer Maßnahme problemlos berücksichtigt werden, da die Verkehrsstärken in beliebig kleinen Intervallen bis hin zur Echtzeit angewendet werden können.

5.1.6 Unterscheidung der einzelnen Fahrzeuge

Zur Bestimmung einzelner Kostenarten müssen die Mengen des abgewickelten Verkehrs quantifiziert werden. Dafür stehen verschiedene Einheiten zur Verfügung, die längen-, massenhafter oder absoluter Natur sind. Diese bilden durch Multiplikation mit Kostenkennwerten die entsprechenden Kosten.

Zur Nutzenbestimmung kann analog vorgegangen werden, indem bspw. Kennwerte zur Nutzenberechnung verwendet werden. Auch hier sind quantifizierte Verkehrsmengen notwendig.

Die Quantifikation von Nutzen stellt in der Praxis jedoch, genau wie die Monetarisierung, eine Schwierigkeit dar, die nur durch entsprechende Abstraktion gelöst werden kann.

5.1.6.1 Theoretische Unterscheidungsmöglichkeiten nach wirtschaftlichem Sinn

Im theoretischen Fall ist der Sinn, und daraus ableitbar der Nutzen, jedes Fahrzeugs und jeder Fahrt bekannt. Durch Multiplikation mit entsprechenden Kennwerten ist eine Bestimmung und monetäre Bewertung des Nutzens dieser Fahrten problemlos möglich.

Dabei würde eine Menge aus n Objekten mithilfe von n Werten dargestellt. Diese 1:1-Beziehung generiert die größte mögliche Genauigkeit. Dennoch stellt sich bereits hier die Frage, ob und inwiefern durch das Bilden von Kategorien und Gruppen eine Vereinfachung möglich ist. Gleiche wirtschaftliche Gründe und Ausprägungen einzelner Fahrten verschiedener Objekte können gruppiert und gemeinsam abgebildet werden.

Solche Gruppierungen können unterschiedlicher Natur sein. So wäre es möglich, Objekte hinsichtlich ihres Nutzens zu gruppieren. Aber auch Unterscheidungen hinsichtlich Masse, Betriebskosten, Geschwindigkeit, Lärm-, Schadstoffemissionen oder CO₂-Ausstoß wären möglich.

5.1.6.2 Praktische Umsetzungsmöglichkeiten

Jedes Fahrzeug, das sich über die betrachteten Streckenabschnitte bewegt, verfolgt einen wirtschaftlichen Zweck in seiner Bewegung. Dieser Zweck ist jedoch nicht bestimmbar. So ist es nicht möglich, der Fahrt eines Pkw zuzuordnen, ob darin eine Familie in ihren Urlaub oder ein Handlungsreisender zu einem Geschäftstermin fährt. Einem Lkw kann der Zweck seiner Fahrt nicht zugeordnet werden (beladen oder Leerfahrt), ebenso wenig kann bspw. der Wert der Ladung bestimmt werden, ohne in das Fahrzeug zu blicken. Es können lediglich Mutmaßungen aufgrund der Zeit der Fahrt angestellt werden.

Unterteilt werden kann jedoch die Art des Fahrzeugs. Der wirtschaftliche Sinn von Einheiten gleicher Klasse muss nicht gleich sein. Neben der Unterscheidung hinsichtlich der Masse in Schwerlastverkehr und Pkw-Verkehr können wesentlich genauere Unterscheidungen angestellt werden. So können Zweiräder unterschieden werden, Lieferwägen, Anhänger, Busse, Sattelkraftfahrzeuge, etc.

Mithilfe dieser Gruppierungen sind Aussagen zu verschiedenen Aspekten weiter konkretisierbar, wenngleich der wirtschaftliche Sinn der Fahrt nicht zur Aussagenbildung herangezogen werden kann.

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) beschreibt die Architektur der Verkehrsbeeinflussungssysteme unter anderem mithilfe der Technischen Lieferbedingungen für Streckenstationen (TLS). Diese kennt 4 Arten der Verkehrserfassung. In der Erfassungsart 1 werden lediglich die Objekte, welche die Zählstellen passieren, gezählt. Die Erfassungsart 2 unterscheidet Pkw- und Lkw-ähnliche Fahrzeuge. Eine Abgrenzung des Schwerlastverkehrs (ab 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht) wird erst durch die Erfassungsart 5+1 ermöglicht. Die Art 8+1 unterscheidet die Pkw-Gruppe noch tiefergehend. Das Suffix +1 bezieht sich dabei auf die zusätzliche Klasse „Sonstige“, die zwar explizit nicht dem Schwerlastverkehr zugeordnet wird, ihm aber sehr wohl angehören kann. Die folgende Tabelle zeigt die Unterschiede der einzelnen Erfassungsarten zusammengefasst auf.

1	2	5+1	8+1	
Kfz	Pkw-ähnlich	nicht klassifizierbare Kfz	nicht klassifizierbare Kfz	SV
		Pkw-Gruppe	Motorräder	
			Pkw ohne Anhänger	
			Lieferwagen ohne Anhänger	
	Lkw-ähnlich	Pkw mit Anhänger	Pkw mit Anhänger	
		Lkw > 3,5 t ohne Anhänger	Lkw > 3,5 t ohne Anhänger	
		Lkw > 3,5 t mit Anhänger / Sattelkraftfahrzeuge	Lkw > 3,5 t mit Anhänger	
			Sattelkraftfahrzeuge	
Busse	Busse			

Tabelle 5-3: Fahrzeugartenerfassung an Zählstellen nach Gerätetyp³³³

Die Erfassungsart 8+1 macht dabei 92,9 % der Zählstellen aus, 5+1 dagegen 4,7 % (Stand 2014).³³⁴

³³³ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*, mit der Unterstützung von Arnd Fitschen und Hartwig Nordmann (Bergisch Gladbach, 2016), S. 9.

³³⁴ Vgl. Bundesanstalt für Straßenwesen: *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*, mit der Unterstützung von Arnd Fitschen und Hartwig Nordmann (Bergisch Gladbach, 2016), S. 9.

5.1.7 Zusammenfassung

Rückblickend auf das Kapitel lassen sich grundlegende Erkenntnisse für die weitere Arbeit ziehen. So ist prinzipiell die wirtschaftliche Bedeutung und die Ausfallbedeutung zu unterscheiden, wenngleich Zusammenhänge deutlich sind.

Die wirtschaftliche Bedeutung bezieht sich auf die Leistung für die Wirtschaft, die das Objekt abwickelt. Sie ist abhängig vom auftretenden Verkehr, den das Objekt unter den gegebenen Bedingungen abwickelt. Die Leistung kann durch erhöhten Verkehr oder abweichende Zusammensetzung steigen und sinken, ohne dass sich die Beschaffenheit des Objektes ändert. Die wirtschaftliche Bedeutung ist ein Produkt des Verkehrs und seiner Bewertungsparameter.

Die Ausfallbedeutung dagegen benötigt per definitionem ein Ausfallereignis (*res defecto*). Darüber hinaus ist eine Beschreibung notwendig, wie sich dieser Ausfall im Verkehrsfluss manifestiert. Wie beschrieben, kann ein Ausfallereignis hinsichtlich Menge und Geschwindigkeit des Verkehrs verschiedene Folgen haben. Die Ausfallbedeutung ist ein Produkt des Verkehrs und seiner Änderung. Dabei entspricht die Änderung der Differenz aus *Ist* und *Soll*.

Zusammenfassend lässt sich so sagen, dass die wirtschaftliche Bedeutung dem *Status quo ante rei* entspricht, sie dementsprechend ohne Ausfallereignis (*sine res defecto*) auskommt. Die Ausfallbedeutung dagegen muss als Differenz zum *Status quo post rei* verstanden werden, die einem Ausfallereignis folgt (*cum res defecto*).

Hier liegt ein schwerwiegender Sachverhalt. Das Ausfallereignis muss vorhanden sein oder wenigstens angenommen werden. Anschließend muss das begleitende Szenario konstruiert werden. Dies ist, abseits konkreter Fälle, zwar möglich, aber unverhältnismäßig, wenn damit jedes mögliche Objekt untersucht werden soll. Für die Ausfallbedeutung gilt das *ex aequo*. Die wirtschaftliche Bedeutung, die ohne Ausfallereignis auskommt, kann dagegen jederzeit bestimmt werden.

Kostenkomponenten sind aus den Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen diverse bekannt. Wie sich diese zusammensetzen, ebenso wie sie sich bei einer Ausfallbetrachtung verändern, ist bekannt. Für die Leistungsberechnung hinsichtlich der wirtschaftlichen Bedeutung lässt sich entsprechend dieser Ergebnisse eine Leistungsmatrix erzeugen und anschließend eine hierarchische Gliederung des Verkehrs ableiten.

Ein Problem ist die ausschließliche Tatsache, dass nur punktbezogenen Informationen vorliegen. Eine Transformation zu längenbezogenen Informationen ist nur auf eingeschränkte Art und Weise möglich.

5.2 Analyse der Vernetzung von Funktionseinheiten

Um eine Hierarchie der Komponenten eines Infrastrukturobjektes vor dem Hintergrund einer Instandhaltungsplanung zu erzeugen, muss das Objekt in diese Komponenten zerlegt und die Komponenten anschließend untersucht werden. Dabei ist zum einen die Bedeutung der Komponenten vor dem Funktionsbetrieb und zum anderen die Bedeutung der Komponente innerhalb des Objektes zu untersuchen.

Aus der Verknüpfung der beiden Bedeutungen lässt sich anschließend eine Hierarchie ableiten, welche die Komponenten nach der Bedeutung hinsichtlich der Funktion des Objektes ordnet.

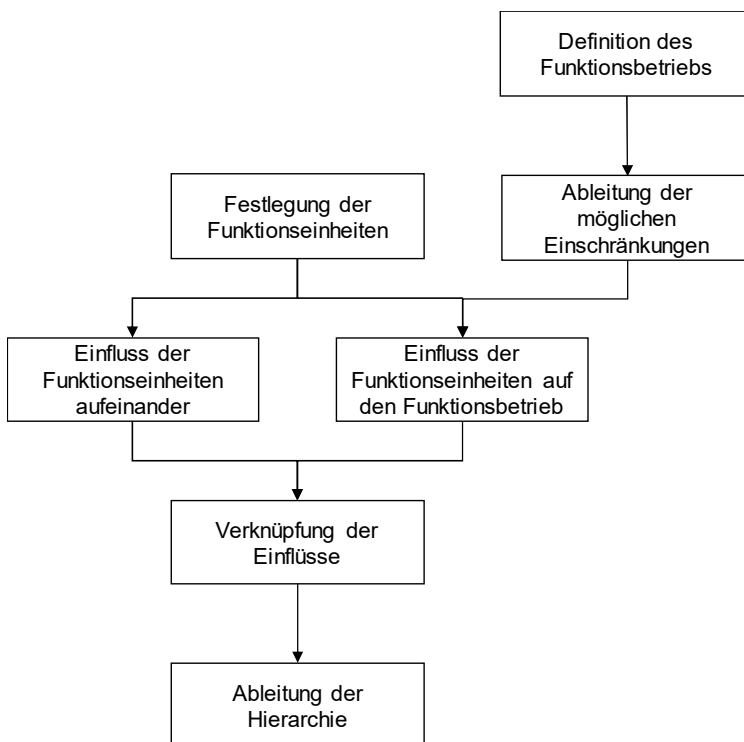


Abbildung 5-10: Darstellung des Prozesses der Hierarchiegenese

Beginnend bei dem Funktionsbetrieb des Objektes, der eigentlichen Objektnutzung, werden die möglichen Einschränkungen auf diesen abgeleitet. Gleichzeitig werden die Funktionen des Objektes untersucht und festgelegt. Dadurch lassen sich anschließend die Einflüsse der Funktionseinheiten auf den Funktionsbetrieb untersuchen. Diese fugalen Einflüsse beschreiben die definierten Einschränkungen als Folge eines Fehlverhaltens der Funktionseinheit(en). Außerdem wird der Einfluss der Funktionseinheiten auf die anderen Funktionseinheiten untersucht. Dies geschieht durch die Identifikation der petalen Einflüsse.

Die Einflüsse werden anschließend verknüpft und aus dem resultierenden Bild kann der Einfluss, den eine Funktionseinheit auf das gesamte System des Objektes, als Summe der Einheiten vor dem Betrieb, hat, abgelesen werden.

Die folgende Abbildung zeigt den Zusammenhang der Elemente der Hierarchiegenese in Anlehnung an Abbildung 5-10:

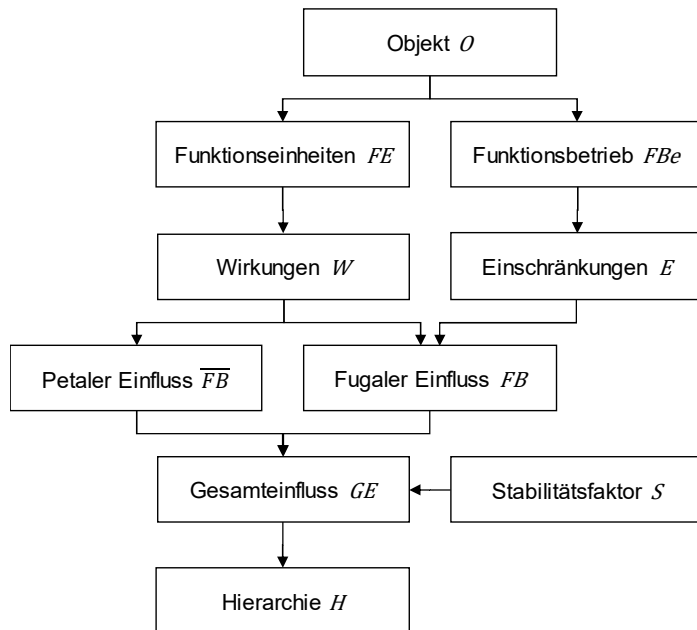


Abbildung 5-11: Kausaler Zusammenhang der Elemente der Hierarchiegenese

5.2.1 Herleitung Funktionseinheiten

Die Funktionseinheiten werden aus der benutzten Infrastrukturimmobilie, d. h. dem Objekt und dem Funktionsbetrieb, abgeleitet. Bei der Funktionseinheit handelt es sich um eine funktional abgegrenzte Einheit. Die Geometrie und räumliche Lage spielen, wenn überhaupt berücksichtigt, nur eine sekundäre Rolle. Eine Funktionseinheit kann vor der Funktion als vollkommen angesehen werden. Sie besteht aus einer endlichen Menge an Elementen e , die in ihr zusammengefasst werden, es gilt so $FE = e_1 + e_2 + \dots + e_n$.

Die Menge der Funktionseinheiten kann für jedes Objekt eine beliebig große, ganzzahlige, endliche Zahl sein, es gilt $M_{FE} = \{FE_1, FE_2, \dots, FE_n\}$ mit der Anzahl der Elemente als Kardinalität $|M_{FE}| = n$.

Eine Auflistung von Funktionen innerhalb von Verkehrsinfrastrukturbauwerken existiert in dieser Form noch nicht. Dennoch gibt es unzählige Regelwerke, die sich mit der Beschreibung einzelner Funktionen befassen (ohne sie als Funktionseinheiten definiert zu haben). Im Folgenden ist ein Auszug gegeben, ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Reihenfolge.

<u>Abk.</u>	<u>Titel</u>	<u>Herausgeber</u>
STLK	Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)
RABT	Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)

RPS	Richtlinien für passiven Schutz an Straßen durch Fahrzeug-Rückhaltesysteme	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)
DIN 1998	Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Verkehrsflächen – Richtlinie für die Planung	DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
VwV-StVO	Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Straßenverkehrsordnung	Bundesrepublik Deutschland
RIZ-ING	Richtzeichnungen für Ingenieurbauten	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
ZTV-ING	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten	Bundesanstalt für Straßenwesen
LB StB-By	Leistungsbeschreibung für den Straßen- und Brückenbau in Bayern	Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr

Tabelle 5-4: Auszug der Richtlinien und Regelwerke für die Beschreibung von Funktionseinheiten

Von den aufgeführten Herausgebern existiert noch eine große Anzahl weiterer Werke. Die primär berücksichtigten Quellen sind an entsprechender Stelle noch einmal angegeben. Eine funktionale der geometrischen Trennung vorzuziehen, ist innerhalb der Literatur nur bedingt gegeben. Während es bei einigen Funktionen die Regel ist, dominiert in anderen Bereichen die räumliche Trennung.

5.2.1.1 Straßeninfrastruktur

Zur Differenzierung der Funktionseinheiten der Straßeninfrastruktur bietet sich die Berücksichtigung der Leistungsbereiche des *Standardleistungskatalogs für den Straßen- und Brückenbau* der *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)* an. Diese bilden bereits eine erste Gliederung in 35 Leistungsbereiche. Zwar ist diese Gliederung nicht zweckmäßig für die Herleitung der Funktionseinheiten, eröffnet aber bereits erste Möglichkeiten. Die eigentliche Aufgabe ist die Erstellung und Fortschreibung standardisierter Texte für Bauleistungen im Straßen- und Brückenbau. Diese dienen zur Ausschreibung, Vergabe und Abrechnung von Leistungen. Entscheidend für die Berücksichtigung an dieser Stelle ist ihre Konformität mit der Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen (VOB), den einschlägigen Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen (ZTV) sowie sonstige Richtlinien (DIN u. ä.).

Reduziert man die Leistungsbereiche um jene, die für den Erhalt der Straßenverkehrsinfrastruktur irrelevant sind, bspw., weil sie nur für die Herstellung notwendig sind oder sich auf Kunstbauten beziehen, so bleiben noch 16 Leistungsbereiche zur Untersuchung übrig, wie sie die folgende Darstellung zeigt:

<u>LB</u>	<u>Bezeichnung</u>
106	Erdbau
107	Landschaftsbauarbeiten
110	Entwässerung für Straßen
113	Asphaltbauweisen

114	Betonbauweisen
115	Pflasterdecken, Plattenbeläge, Einfassungen
117	Gründungen
127	Lärmschutzkonstruktionen
128	Zäune, Holzgeländer
129	Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen
130	Verkehrsschilder
131	Fahrbahnmarkierungen
132	Lichtsignalanlagen
133	Straßenbeleuchtung
134	Kabelverlegung
135	Streckenfernmeldekabelmontage

Tabelle 5-5: Für den Erhalt relevante Leistungsbereiche nach STLK für Straßen

Innerhalb der Leistungsbereiche sind mehrere Differenzierungen notwendig. Als Erdbau soll Erdmasse verstanden werden, die durch die Herstellung der Straße bewegt wurde. Sie grenzt sich dadurch vom Untergrund ab. Nach oben ist sie abgegrenzt, da es sich nach wie vor um Erdmasse ohne Zusätze handelt. Der Begriff *Unterbau* entspricht ihr.

Die Leistungsbereiche der Asphalt- und Betonbauweisen sowie der Pflasterdecken, Plattenbeläge und Einfassungen stellen die Deckschicht dar. Da in diesem Fall die Art der Deckschicht irrelevant ist, können die drei Leistungsbereiche zu einer Position verallgemeinert werden.

Die Gründung einer Straße entspricht nicht der Gründung im klassischen Sinne. Dennoch kann die Tragschicht (als zweiter Teil des Oberbaus neben der Deckschicht) als solche verstanden werden. Auch ihre Aufgabe ist es, die Last der Straße an den Unterbau und Untergrund weiterzugeben und die Standsicherheit zu gewährleisten.

Zuletzt müssen die Leistungsbereiche Kabelverlegung und Streckenfernmeldekabelmontage angepasst werden. Hierbei handelt es sich um einen Prozess der Herstellung. Diese werden für den Erhalt nicht berücksichtigt. Der Gegenstand des Prozesses wird dabei aber sehr wohl berücksichtigt. Daher werden die Leistungsbereiche innerhalb der entsprechenden mitaufgenommen, hier entspricht das den Lichtsignalanlagen und der Straßenbeleuchtung.

Die restlichen Leistungsbereiche können in ihrer Art als Grundlage der Funktionseinheiten verwendet werden. Es ergibt sich so, unter Berücksichtigung der angesprochenen Differenzierungen, ein Umfang von 12 Funktionseinheiten.

<u>Nr.</u>	<u>Funktionseinheit</u>
1	Unterbau
2	Landschaftsbauarbeiten (Bankette, Böschung, Mittelstreifen)

3	Entwässerung
4	Deckschicht
5	Tragschicht
6	Lärmschutzkonstruktionen
7	Zäune, Holzgeländer
8	Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen
9	Verkehrsschilder
10	Fahrbahnmarkierungen
11	Lichtsignalanlagen
12	Straßenbeleuchtung

Tabelle 5-6: Funktionseinheiten einer Straße

Diese Funktionseinheiten stellen den Funktionskreis Straße dar. Das bedeutet, dass sie in dieser Form im Grunde auch dort anzutreffen sind, wo die Straße auf ein Ingenieurbauwerk trifft. Dort kommt es dann zur Überlagerung mit den Funktionseinheiten des Ingenieurbauwerks.

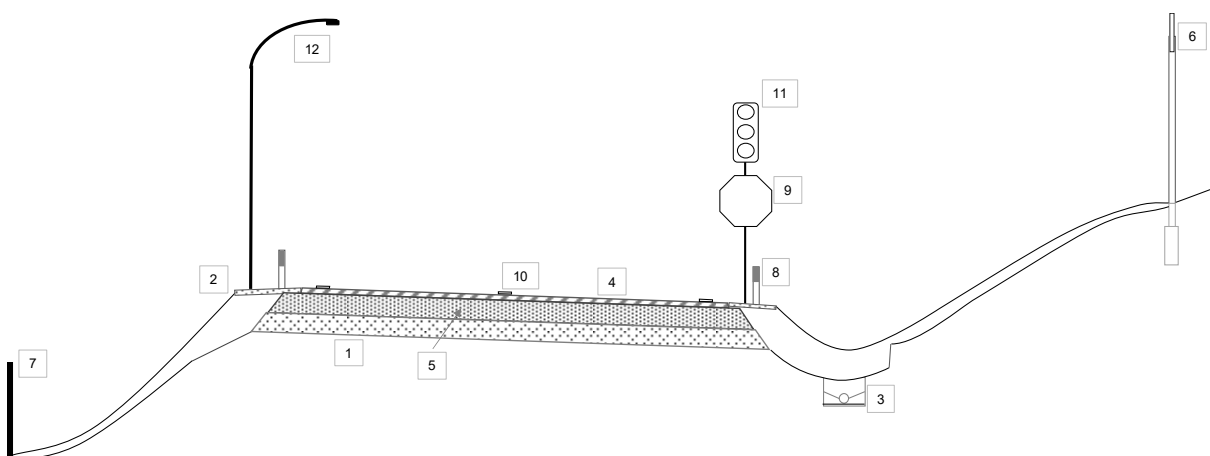


Abbildung 5-12: Querschnitt einer Straße mit den Funktionseinheiten

5.2.1.2 Brücken

Bei der Bestimmung der Funktionseinheiten von Straßenbrücken bietet sich eine ähnliche Vorgehensweise an wie bei der Straße selbst. Der *Standardleistungskatalog für den Straßen- und Brückenbau* der *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V. (FGSV)* ist auch für Brücken ausgelegt. Jedoch gibt es Bereiche, die im Katalog nur unzureichend behandelt werden.

Der Leistungsbereich *Kunstbauten aus Stahl und Stahlbeton* deckt im Prinzip das gesamte Tragwerk mit Pfeiler, Stützen, Widerlager und Überbau ab. Vor dem Hintergrund der Funktionalität und Geometrie ist eine Unterscheidung der Bereiche jedoch nicht einfach auszuschließen. Vor allem in jenen Fällen, in den ein solcher Bereich von einer anderen Funktionseinheit tangiert wird, ist davon auszugehen, dass nicht automatisch alle genannten tangiert werden.

Zum gleichen Leistungsbereich können die Kappen gezählt werden. Doch auch diese sollen separat betrachtet werden. Ebenso wie die Ausstattung der Brücke zusätzliche Funktionseinheiten benötigt. Dort scheinen zwar alle wichtigen vorhanden zu sein, es fehlt aber bspw. der Vogeleinflugschutz, der im Bereich der Lager mitunter eine wichtige Funktion erfüllt.

Auf Basis der Leistungsbereiche, der weiteren genannten Literaturquellen und der Betrachtung der physikalischen Abhängigkeiten lassen sich unter Berücksichtigung der Anpassung und Erweiterung 19 Funktionseinheiten bilden, die im Folgenden dargestellt sind. Die Nummerierung stellt dabei keine Ordnung dar.

<u>Nr.</u>	<u>Funktionseinheit</u>
1	Gründung
2	Widerlager
3	Stützen und Pfeiler (Tragwerk vertikal)
4	Überbau (Tragwerk horizontal)
5	Lager
6	Übergänge
7	Geländer
8	Kappen
9	Fahrbahn
10	Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen
11	Verkehrsschilder
12	Fahrbahnmarkierungen
13	Lärmschutzkonstruktionen
14	Lichtsignalanlagen
15	Straßenbeleuchtung
16	Vogeleinflugschutz
17	Entwässerung Fahrbahn
18	Entwässerung Bauwerk
19	Landschaftsbauarbeiten (Widerlager und Gründungsbereich, inkl. Böschungstreppe)

Tabelle 5-7: Funktionseinheiten einer Straßenverkehrsbrücke

Die einzelnen Funktionseinheiten lassen sich übersichtlich in der folgenden Abbildung, die eine exemplarische Straßenverkehrsbrücke darstellt, wiederfinden. Einzelne Funktionseinheiten sind dabei zusammengefasst, die Fahrbahnmarkierung und die Fahrbahn selbst bspw., aber auch die Ausstattung auf den Kappen, die neben dem Geländer auch Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen, Verkehrsschilder, Signalanlagen und ähnliches beinhaltet.

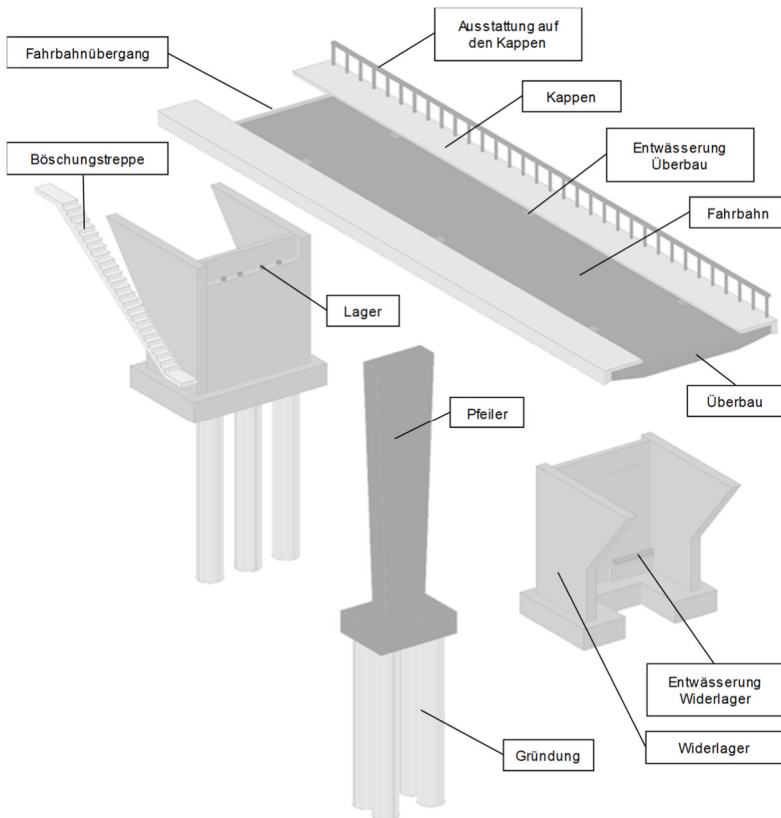


Abbildung 5-13: 3-Dimensionale Darstellung der Funktionseinheiten einer Straßenverkehrsbrücke

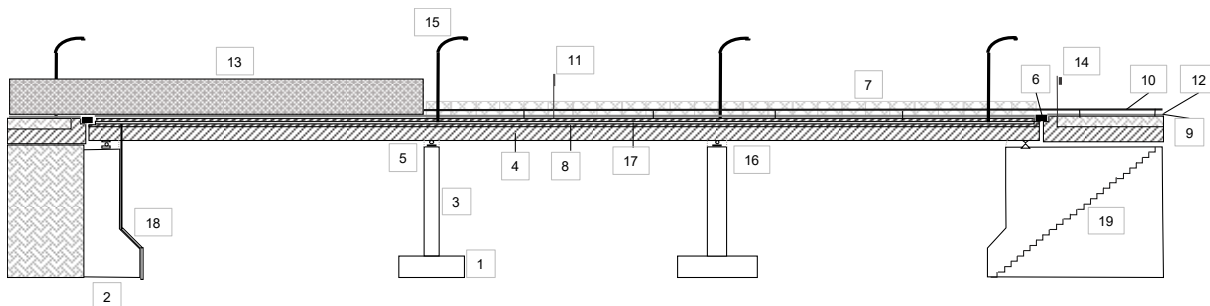


Abbildung 5-14: Längsschnitt einer Brücke mit Funktionseinheiten

5.2.1.3 Tunnel

Die Tunnelinfrastruktur kann im ersten Schritt in zwei Teile untergliedert werden. Das Ingenieurbauwerk Tunnel auf der einen Seite und die Straße auf der anderen Seite. Für letzteres sind die Funktionseinheiten bereits hergeleitet worden. Zwar unterscheidet sich der Straßenaufbau in einem Tunnel durchaus von einer freien Strecke, die Funktionseinheiten ändern sich jedoch nicht, wenngleich die Elemente verschieden sein können.

Der eigentliche Tunnel lässt sich in die gesicherte und vorbereitete Röhre, die im weiten Sinne den Rohbau des Tunnels darstellt, und den Ausbau für den Verkehrsträger selbst, gliedern. Erster Bereich hinterlässt eine zweischalige, dichte Röhre (der Begriff Röhre wird hier unabhängig von dessen Querschnitt verwendet) inklusive etwaiger Auffüllung.

Der Ausbau seinerseits besteht weiterhin aus zwei Komponenten: dem baukonstruktiven und dem technischen Ausbau. Der baukonstruktive Ausbau ordnet der Röhre jene Komponenten für den Funktionsbetrieb zu, die nach DIN 276 der Kostengruppe 300 angehören, bspw. den Fahrbahnaufbau, die Kappen & Gehwege und die Anprallwände. Der technische Ausbau umfasst die Komponenten, die sich der Kostengruppe 400 zuordnen lassen. Dazu gehören neben Entwässerung und Beleuchtung vor allem auch die Brandschutzanlagen.

Die Funktionseinheiten lassen sich dieser Gliederung folgend aus der einschlägigen Literatur herleiten. Während die Tunnelröhre vergleichsweise trivial aufgebaut ist, ist der Ausbau dagegen deutlich komplexer. Verschiedene technische Regelwerke wie die *Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln (RABT)* befassen sich mit dem Ausbau. Die RABT gibt, gerade für den technischen Ausbau, erste Einteilungen in sogenannte Objektgruppen. Diese erfüllen zwar nicht die Anforderungen an Funktionseinheiten (bspw. durch die Trennung von Verbraucher und zugehöriger Versorgungsleitung(en)), können aber angepasst werden.

Letztlich lassen sich unter Berücksichtigung der Straße (als Grundlage für den Funktionsbetrieb) für den Tunnel folgende 19 Funktionseinheiten bestimmen.

<u>Nr.</u>	<u>Funktionseinheit</u>
1	Außenschale
2	Dichtung
3	Innenschale
4	Auffüllung
5	Fahrbahn
6	Fahrbahnmarkierungen
7	Verkehrsschilder
8	Anprallwand
9	Kappen/Gehwege
10	Baulicher Brandschutz
11	Schutz- und Rettungstüren
12	Entwässerung
13	Beleuchtung
14	Lüftung
15	Lichtsignalanlagen
16	Kommunikation
17	Videoüberwachung
18	BMA
19	Löscheinrichtungen

Tabelle 5-8: Funktionseinheiten eines Straßenverkehrstunnel

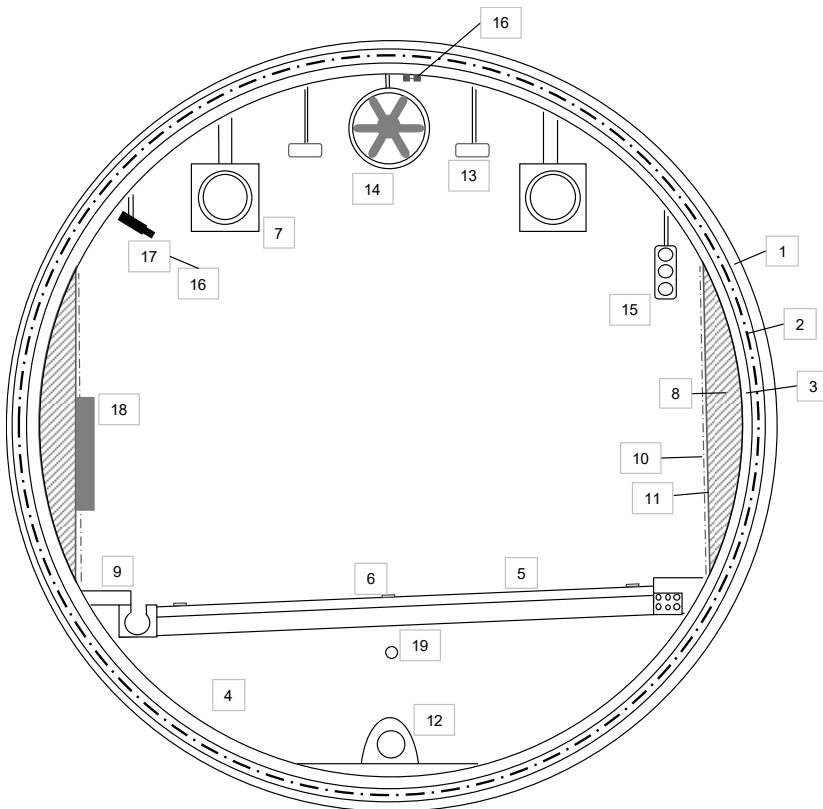


Abbildung 5-15: Querschnitt eines Tunnels mit Funktionseinheiten

5.2.2 Definition des Funktionsbetriebs

Der Funktionsbetrieb der Verkehrsinfrastruktur entspricht dem Sinne des „Verkehrs“. Er soll als die Bewegung von Einheiten (Fahrzeugen) auf den Straßen verstanden werden. Die Straßen können wiederum (optional) durch Ingenieurbauwerke tangiert werden. Der Funktionsbetrieb von Straße, Tunnel und Brücke ist im Grunde dabei identisch. Die Menge der Funktionsbetriebe ist demnach $M_{FBe} = \{FBe\}$, die Kardinalität schlicht $|M_{FBe}| = 1$.

Der „Verkehr“, gemeinhin das „Fahren“ erscheint als trivialer Vorgang und bedarf keiner weiteren Definition als sie bereits ordnungsgesetzlich definiert ist. Entscheidend für die Grenzen hinsichtlich des Funktionsbetriebes sind die darüberhinausgehenden lokal bestehenden Verkehrsregeln.

Allgemein betrachtet, ist der Funktionsbetrieb der Straßeninfrastruktur dann zu 100 % gegeben, wenn die Einheiten, die am Verkehr teilnehmen, die Infrastruktur entsprechend der globalen (bzw. nationalen) Rechtsnormen sowie der lokalen Verkehrsregeln nutzen können.

Dies impliziert eine Einschränkung des Funktionsbetriebes genau dann, wenn dieser nicht mehr zu 100 % gewährleistet ist. Dabei sind zwei Ursachen zu differenzieren:

Bei der *Einschränkung des Funktionsbetriebes infolge des Objektbetriebes* handelt es sich um Folgen unangemessener Instandhaltung. Die Substanz der Infrastruktur ist unzureichend, um den Funktionsbetrieb uneingeschränkt zuzulassen. Dieses Problem ist die klassische Einschränkung, die aus der Sphäre des Betriebs hervorgeht, und im Folgenden untersucht werden soll. Der Objektbetrieb wird dabei als aktiv verwalteter Prozess verstanden, der auf die Anforderungen, welche die Substanz stellt, agiert und reagiert.

Bei der *Einschränkung des Funktionsbetriebes infolge unzureichender Dimensionierung* übersteigt der Verkehr jenen, der infolge der Planung maximal möglich ist. Der Verkehr behindert sich selbst, sodass der Funktionsbetrieb nicht mehr zu 100 % möglich ist. Zwar kann ein erhöhtes Verkehrsaufkommen den Objektbetrieb (in der Regel negativ) beeinflussen, was in der Folge zur bereits erwähnten Einschränkung infolge des Objektbetriebes führen kann. Jedoch handelt es sich hierbei primär um ein Problem, welches entweder auf einen Planungsfehler, einen akzeptierten (vorübergehenden wenn auch wiederkehrenden) Zustand oder auf eine Folge zeitlicher Veränderung zurückführbar ist.

5.2.2.1 Herleitung der Einschränkungen

Die Einschränkungen des Funktionsbetriebes lassen sich mittels des Parameters Geschwindigkeit beschreiben. Liegt die maximal mögliche Geschwindigkeit bei der zulässigen Geschwindigkeit, so beträgt das Potential des Verkehrs 100 %. Besonders leicht kann die Einschränkung bei der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h festgestellt werden, da hier die maximal mögliche Geschwindigkeit in km/h dem Potential entspricht. Durch einschränkende Maßnahmen kann dieses reduziert werden. Mittels des Verkehrszeichens *Zulässige Höchstgeschwindigkeit* (274-x, StVO) wird die Einschränkung in 10 km/h-Schritten reduziert (Ausnahme: *Zulässige Höchstgeschwindigkeit 5 km/h* (274-50, StVO)). Wird eine Fahrspur für den Verkehr gesperrt, beträgt das Potential 0 %. Hierbei muss unterschieden werden, ob alle Richtungsfahrspuren gesperrt sind und das Potential der gesamten Richtungsfahrbahn 0 % beträgt oder ob nur ein Teil der Richtungsfahrspuren gesperrt ist und das Potential der gesamten Richtungsfahrbahn größer Null ist.

Des Weiteren gilt, dass eine Einschränkung je Fahrzeuggruppe betrachtet werden muss. So kann mittels *Verbot für Fahrzeuge über angegebenes tatsächliches Gewicht* (262, StVO) oder *Verbot für Fahrzeuge über angegebene tatsächliche Achslast* (263, StVO) eine Einschränkung nur für eine bestimmte Fahrzeuggruppe verhängt werden.

Zudem ist es möglich, resultierende Einschränkungen als Überlagerung oder Summe von Einschränkungen zu beschreiben. Eine Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit in einem bestimmten Fall, z.B. bei Nässe, entspricht der Überlagerung zweier Zustände an Einschränkungen, nämlich der fehlenden Einschränkung und der geschwindigkeitsreduzierenden Einschränkung. Ebenso ergibt die Teilspernung aller Richtungsfahrspuren die Vollsperrung einer

Richtungsfahrbahn. Unter Berücksichtigung der Fahrzeuggruppen kann zudem der Zustand einer reduzierten Geschwindigkeit für Pkw bei gleichzeitiger Sperrung für den Lkw-Verkehr als Überlagerung der beiden Zustände je Fahrzeugart verstanden werden.

Neben diesen zwingenden durch Verkehrszeichen verordneten Einschränkungen existieren auch hinweisende Einschränkungen, wie die Warnung vor Straßenschäden (101 + 1007,34 StVO). Solche Hinweise auf Gefahrenstellen ohne regelnden Charakter werden nicht als eigenständige Einschränkung definiert.

Die Anordnung von Streckenverböten und -einschränkungen erfolgt unter Betrachtung des Einzelfalls. Entsprechend der StVO, als Rechtsverordnung von der Exekutive erlassen, erfordert eine Anordnung die Beurteilung der Situation durch entsprechend Bevollmächtigte (Polizei, Straßenbaubehörde, Straßenmeisterei, Straßenverkehrsbehörde) und deren positive Einschätzung bzgl. einer Anordnung nach StVO.³³⁵ Allgemein bedeutet das, dass einer straßenverkehrsrechtlichen Einschränkung eine sicherheitsgefährdende Ursache vorausgeht.

Die möglichen Einschränkungen, unter Hinzuziehung der fehlenden Einschränkung, werden im Folgenden beschrieben. Es existieren in dieser Form 4 verschiedene Möglichkeiten, somit ergibt sich die Menge zu folgendem Quadrupel: $M_E = \{E_0, E_1, E_2, E_4\}$, mit der Kardinalität $|M_E| = 4$.

5.2.2.1.1 Keine Einschränkung (E0)

Beeinflusst der Wegfall einer Funktionseinheit den Funktionsbetrieb in keiner Weise, so lässt sich die Funktionseinheit mit keiner Einschränkung verknüpfen. Es handelt sich dabei um einen der beiden Randfälle innerhalb der Betrachtung.

Da die Infrastruktur, bzw. hier das untersuchte Objekt, seinen Sinn im Funktionsbetrieb hat, ist dieser Fall im Grunde auszuschließen. Eine Funktionseinheit, die den Funktionsbetrieb nicht tangiert, wäre schlicht überflüssig. Eine Recht auf Bestehen einer Funktionseinheit am Funktionsbetrieb alleine festzumachen, impliziert jedoch wieder einen betriebswirtschaftlichen Gedanken. Eine Funktionseinheit kann so dennoch einen volkswirtschaftlichen Nutzen erzeugen. Ein Beispiel dafür ist die Beleuchtung von Autobahnen. Sie ist, zumindest in Deutschland, vollkommen optional, wird in urbaneren Gebieten teilweise verwendet, teilweise aus historischen Gründen.

³³⁵ Bundesrepublik Deutschland: *Straßenverkehrsordnung (StVO)* (2013)§ 45, Abs 9: Verkehrszeichen und Verkehrseinrichtungen sind nur dort anzuordnen, wo dies auf Grund der besonderen Umstände zwingend erforderlich ist. Dabei dürfen Gefahrzeichen nur dort angeordnet werden, wo es für die Sicherheit des Verkehrs erforderlich ist, weil auch ein aufmerksamer Verkehrsteilnehmer die Gefahr nicht oder nicht rechtzeitig erkennen kann und auch nicht mit ihr rechnen muss. Insbesondere Beschränkungen und Verbote des fließenden Verkehrs dürfen nur angeordnet werden, wenn auf Grund der besonderen örtlichen Verhältnisse eine Gefahrenlage besteht, die das allgemeine Risiko einer Beeinträchtigung der in den vorstehenden Absätzen genannten Rechtsgüter erheblich übersteigt.

Solange eine Funktionseinheit vorhanden ist, muss davon ausgegangen werden, dass sie auch instandgehalten werden muss. Das gilt auch für optionale Einheiten. Aus diesem Grund müssen diese Berücksichtigung finden und die fehlende Einschränkung muss als mögliche Einschränkung behandelt werden.

5.2.2.1.2 Herabsetzung der Geschwindigkeit (E1)

Entsteht eine Gefahrenstelle und ein Verbot des Passierens ist nicht vorgesehen, so ist die Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit im Bereich der Gefahrenstelle die Regel. Die Herabsetzung erzeugt eine lineare Reduzierung des Potentials des Funktionsbetriebs.

Die Einschränkung ist relevant für Funktionseinheiten, deren Wegfall die Sicherheit nur bei entsprechender Geschwindigkeit beeinflusst. Beispiele dafür können Griffigkeits- oder Entwässerungsprobleme sein, die bei vergleichsweise geringer Geschwindigkeit entfallen. Zusätzlich wirken diese Einheiten in der Regel direkt auf den Funktionsbetrieb bzw. die fahrenden Fahrzeuge.

5.2.2.1.3 Teilspernung der Fahrbahn (E2)

Hier finden sich Einschränkungen, welche die Sicherheit des Funktionsbetriebs in einem Maße beeinflussen, dass eine Überfahrt der betroffenen Bereiche nicht mehr möglich ist. Zudem muss von einer Ausweitung des Schadens unter Belastung auf die benachbarten Fahrspuren ausgegangen werden. Tiefgehende Schäden der Fahrbahn in die Tragschicht herein führen bspw. zu einer solchen Eingruppierung.

Eine lokale Sperrung kann immer auch verhängt werden, wenn die Standsicherheit des Objektes gefährdet ist. Dies ist vor allem bei Brücken von großer Relevanz.

5.2.2.1.4 Vollsperrung der Fahrbahn (E3)

Diese Einschränkungen wirken, im Gegensatz zu denen, die zur Herabsetzung der Geschwindigkeit oder Teilspernung führen, direkt auf die Sicherheit des Objektes (z.B. Statik), die auch ohne Funktionsbetrieb selbst nicht mehr gegeben wäre. Aber auch Gefahren für Leib und Leben (seitliche Sicherheitseinrichtungen) können die Folge sein. Hier finden sich demzufolge systemkritische Elemente, deren Wegfall die größte Gefahr darstellt.

5.2.3 Bestimmung des systemimmanenten/petalen Einflusses (der FE)

Der petale (systemimmanente) Einfluss entsteht durch die Funktionseinheiten selbst bzw. deren Wechselwirkung untereinander. Sie werden mittels Faktoren linear verknüpft. Daraus ergeben sich Aktiv- und Passivsummen, welche die Einflusstärken der jeweiligen Funktionseinheiten visualisieren können. Im Vordergrund steht dabei, entsprechend der Bezeichnung

„Funktionseinheit“, die Funktion. Das Objekt wird dementsprechend als Summe der Funktionen betrachtet.

In der Analyse der Wechselwirkungen werden Faktoren als Variablen zur Beschreibung der Einflüsse verwendet. Die Bewertung soll mit vier Variablen vollzogen werden:

- kein Einfluss
- geringer, kaum spürbarer Einfluss
- mittlerer Einfluss
- starker Einfluss

Die Bewertung des petalen Einflusses ist primär von der geometrischen Beschaffenheit des Objektes abhängig. Das Objekt, als Summe der Funktionseinheiten, wird hinsichtlich Funktionalität und Lage untersucht. Funktionseinheiten, die sich weder geometrisch noch funktional tangieren, haben keinen direkten Einfluss bzw. keine direkte Wirkung aufeinander. Liegt eine Tangierung vor, aber keine funktionale Abhängigkeit, so kann von einem geringen Einfluss ausgegangen werden. Liegt eine, zumindest physikalische, Beeinflussung vor, so ist der Einfluss von mittlerer Intensität. Auswirkungen der Gravitation können solche Einflüsse bewirken, das sind solche, die in der Regel „von oben nach unten“ wirken. Als hoher Einfluss können letztendlich solche verstanden werden, die eine direkt funktionale Beeinflussung ausüben können. Dadurch ergeben sich die Abgrenzungen der vier Variablen.

	Einfluss			
	Kein	Gering	Mittel	Stark
Petal	Unabhängig ggü. anderer FE	Geometrische Tangierung der FE	Physikalische Beeinflussung der FE	Funktionale Beeinflussung der FE
Fugal	Führt zu Einschränkung 0	Führt zu Einschränkung 1	Führt zu Einschränkung 2	Führt zu Einschränkung 3

Abbildung 5-16: Abgrenzung der Einflussstärken im petalen Bereich

Die Wirkung wird als Menge der möglichen Stärken gewählt. Es sollen vier Möglichkeiten Berücksichtigung finden, nämlich keine (:= 0) / geringe (:= 1) / mittlere (:= 2) und starke (:= 3) Wirkung. Damit ergibt sich die Menge der Wirkungen zum Quadrupel $M_W = \{0, 1, 2, 3\}$, mit der Kardinalität $|M| = 4$. Die Wirkungen entsprechen folglich den Einflüssen.

5.2.4 Bestimmung des fugalen Einflusses (der FE)

Der fugale Einfluss der Funktionseinheiten ist jener Einfluss, der aus der Wirkung der Funktionseinheiten selbst in direkter Weise auf den Funktionsbetrieb entsteht. Es handelt sich dabei nicht um eine klassische Wechselwirkungsanalyse, da die Wirkung nur in eine Richtung,

von der Funktionseinheit zum Funktionsbetrieb, berücksichtigt wird. Die Passivität des Funktionsbetriebes ist somit a priori maximal und größer Null. Umgekehrt ist aufgrund der fehlenden Wechselwirkung die Passivität der Funktionseinheiten Null. Für die Aktivität gilt umgekehrt, dass die des Funktionsbetriebes Null ist und die der Funktionseinheiten größer (bzw. gleich) Null ist. Die Passivität wird allerdings auch nicht verlangt, es wird in der späteren Untersuchung nur die Aktivität der Funktionseinheiten berücksichtigt.

In der Bewertung des fughalen Einflusses werden die vier definierten Einflüsse direkt auf den Funktionsbetrieb angewendet. Dabei werden die Einflüsse mit den Einschränkungen in Beziehung gebracht. Hat eine Funktionseinheit keinen Einfluss auf den Funktionsbetrieb, so führt sie auch zu keiner Einschränkung. Hat sie einen geringen Einfluss, so führt sie auch zu einer geringeren Einschränkung, ebenso wie eine Herabsetzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Ein mittlerer Einfluss auf den Funktionsbetrieb kann sich durch die Teilspernung für den Verkehr oder einer Verkehrsgruppe manifestieren. Und ein starker Einfluss spiegelt sich in der Vollsperrung wider. Vorstellen kann man sich diese Beziehung im Was-wäre-wenn-Szenario, wenn eine Funktionseinheit ausfällt und der Effekt auf den Funktionsbetrieb untersucht wird.

		Einfluss			
		Kein	Gering	Mittel	Stark
Petal		Unabhängig ggü. anderer FE	Geometrische Tangierung der FE	Physikalische Beeinflussung der FE	Funktionale Beeinflussung der FE
Fugal		Führt zu Einschränkung 0	Führt zu Einschränkung 1	Führt zu Einschränkung 2	Führt zu Einschränkung 3

Abbildung 5-17: Abgrenzung der Einflussstärken im fughalen Bereich

Analog zum petalen Einfluss wird die Wirkung auch hier als Menge der möglichen Stärken gewählt. Es werden ebenfalls vier Möglichkeiten Berücksichtigung finden, keine ($:= 0$) / geringe ($:= 1$) / mittlere ($:= 2$) und starke ($:= 3$) Wirkung. Damit ergibt sich die Menge der Wirkungen identisch zum petalen Einfluss zum Quadrupel $M_W = \{0, 1, 2, 3\}$, mit der Kardinalität $|M| = 4$. Die Wirkungen W sind somit in beiden Fällen identisch und werden übergreifend mit W abgekürzt. Dabei ist auch hier offensichtlich, dass die Einflüsse den Wirkungen entsprechen.

5.2.5 Verknüpfung des petalen und fughalen Einflusses

Die Einflüsse der Funktionseinheiten untereinander (petal) und auf den Funktionsbetrieb (fugal) sollen verknüpft werden, um objektbezogen eine wirtschaftliche Aussage tätigen zu können. Dazu werden die Einflüsse p (petal) und f (fugal) nach dem Schema $f \circ p$ verknüpft, eine Operatorassoziativität wird nicht berücksichtigt.

Der fugale Einfluss soll auf einer normierten Skala im Intervall von 0 bis 1 angegeben werden. Da eine ordinale Beziehung verlangt wird, ist diese Skala ausreichend. Die Einschränkungen werden auf der Skala gleichverteilt. *Keine Einschränkung (E0)* bedeutet den Wert 0, eine *Vollsperrung (E3)* den Wert 1. Die beiden Einschränkungen *Herabsetzung der Geschwindigkeit (E1)* und *Teilspernung (E2)* werden im Drittels- bzw. Zweidrittelpunkt angesetzt.

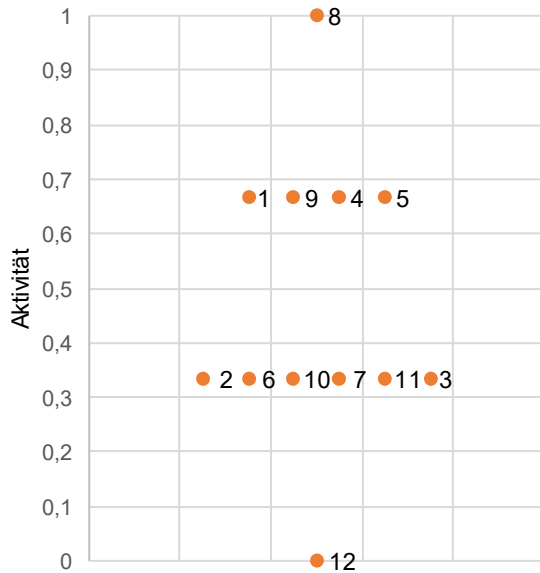


Abbildung 5-18: Darstellung der Funktionseinheiten in Abhängigkeit vom Einfluss auf den Funktionsbetrieb als Quelle eines Transformationsprozesses

Die Funktionseinheiten werden entsprechend zugeordnet und sollen den Startpunkt eines Transformationsprozesses darstellen.

Der petale Einfluss wird als Ergebnis einer Vernetzungsanalyse in Abhängigkeit von den Aktiv- und Passivsummen ausgegeben. Als Skala wird ebenfalls eine normierte Skala im Intervall von 0 bis 1 verwendet. Anschließend sollen die Aktivsummen eine Transformation der Funktionseinheiten anstoßen.

Vorgesehen ist nun eine Verknüpfung der beiden Werte und eine anschließende Normierung. Das Ergebnis soll dementsprechend eine zweidimensionale Darstellung von Aktivität und Passivität im Intervall von 0 und 1 sein.

Zwei Möglichkeiten der Verknüpfung sind die Addition und die Multiplikation der jeweiligen Werte. Der Einfluss auf den Funktionsbetrieb sei durch FB ausgedrückt, der Einfluss innerhalb des Systems durch \overline{FB} . In beiden Fällen wird im Anschluss eine Normierung vorgenommen.

$$\overline{FB} \oplus FB = AS_F$$

$$\|AS_F\| = \|\overline{FB} \oplus FB\|$$

Formel 5-17: Verknüpfung mittels Addition mit anschließender Normierung

$$\overline{FB} \otimes FB = AS_F$$

$$\|AS_F\| = \|\overline{FB} \otimes FB\|$$

Formel 5-18: Verknüpfung mittels Multiplikation mit anschließender Normierung

Die Multiplikation hat dabei einen entscheidenden Nachteil, da das Produkt der beiden Faktoren in dem Moment, in dem einer der Faktoren Null ist, ebenfalls zu Null wird. Das heißt, dass der andere Einfluss egalisiert wird, ganz gleich wie hoch er ist. Aus diesem Grund muss einer multiplikativen Verknüpfung stets eine besondere Aufmerksamkeit zukommen, wenn es um besonders kleine Einflüsse geht. Ein weiterer Nachteil kann der steigende Abstand von möglichen Punkten im Bereich großer Einflüsse sein. Wie bereits bei der Betrachtung der Risikoprioritätszahl aufgezeigt, steigt das Produkt exponentiell an. Entlang der Skala ist eine quantifizierende Aussage dann nicht mehr möglich. Sehr wohl bestehen bleibt dagegen die ordinale Beziehung. Dies lässt sich im Bereich der Funktionseinheiten für Straßen auch zeigen. Die Reihenfolge des Einflusses der Funktionseinheiten bleibt gleich, wenngleich bei der multiplikativen Betrachtung die Einheiten mit dem geringsten Einfluss Null werden.

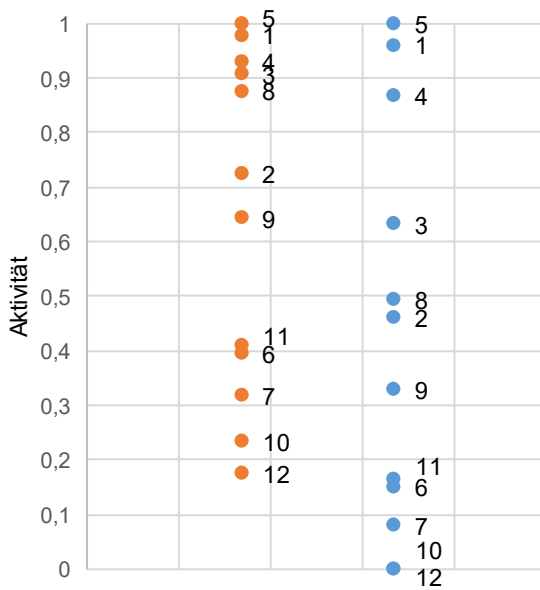


Abbildung 5-19: Verknüpfung der Einflüsse mittels Addition (links) und Multiplikation (rechts)

Zwar wirkt das Ergebnis der multiplikativen Methode auf den ersten Blick übersichtlicher, dabei handelt es sich jedoch um ein zufälliges Ereignis. Die Einheiten mit hohen Einflüssen wirken „entzerrter“. Die tatsächliche Nähe der Punkte wird in der Darstellung der additiven Methode wesentlich besser beschrieben. Ist die Wahl für die ordinale Beziehung praktisch irrelevant, so ist die additive Darstellung in der qualitativen Gesamtbetrachtung der multiplikativen vorzuziehen.

Ein weiteres Problem der Verknüpfung liegt darin, dass die beiden Einflüsse gleichberechtigt sind. Sie stehen sich auf Augenhöhe gegenüber, was nach den Regeln der Numerik auch richtig und gewollt ist. Diese Methodik ist aber nicht in der Lage, bestimmte externe Einflüsse sinngemäß

abzubilden, da der petale Einfluss nur innerhalb des Systems, der fugale Einfluss nur aus dem System nach außen wirkend aufgebaut ist. Von außen einwirkende Einflüsse, die entsprechend der Absicht der Untersuchung ausgeschlossen werden, finden keine Berücksichtigung. Problematisch wird das nun bei der Ableitung des Einflusses auf den Funktionsbetrieb von Einheiten, die per definitionem den Funktionsbetrieb unterbinden. Diese im Bereich der *Vollsperrung der Fahrbahn* liegenden Funktionseinheiten sind systemkritisch vor der allgemeinen Betriebssicherheit. Exemplarisch lassen sich Brückengeländer nennen, deren Fehlen zur Vollsperrung führt. Damit ist ihr Einfluss aus Rechtsgründen sehr hoch, der fugale Einfluss dementsprechend ebenso. Petal ist ihr Einfluss jedoch extrem gering, da sie innerhalb des Systems kaum Aktivität aufweisen können.

In einer weitergehenden Betrachtungsweise soll daher nun dem fugalen Einfluss eine Robustheit mitgegeben werden. Dabei wird die Robustheit definiert, als das Maß des Systems, seine anfängliche Struktur beizubehalten und einer Verschiebung standzuhalten. Diese Definition ist konform zur klassischen Definition, bspw. in der Numerik, wenngleich ein anderer Ansatz gewählt wird. Das Ziel besteht darin, eine Stabilität gegenüber der petalen Einflüsse zu erzeugen. So soll ein fugaler Einfluss weniger durch den petalen Einfluss beeinflusst werden, je höher sein Wert ist.

Beide Möglichkeiten, sowohl die Verknüpfung mittels Addition als auch die mittels Multiplikation können auf diese Art und Weise behandelt werden. Auch hier folgt auf die Verknüpfung die Normierung. Der Parameter, durch den die Robustheit Berücksichtigung findet, wird im Folgenden x genannt. Durch den Ausdruck $(x + \bar{x}) = 1$ ergibt sich umgekehrt $(1 - x) = \bar{x}$. Es wird somit der Einfluss auf den Funktionsbetrieb gegenüber dem internen Einfluss mit x zu \bar{x} gewichtet.

$$\begin{aligned} (\overline{FB} * \bar{x}) \oplus (FB * x) &= AS_F \text{ mit } (x + \bar{x}) = 1 \\ \|AS_F\| &= \|(\overline{FB} * x) \oplus (FB * \bar{x})\| \end{aligned}$$

Formel 5-19: Verknüpfung mittels gewichteter Addition mit anschließender Normierung

$$\begin{aligned} (\overline{FB} * \bar{x}) \otimes (FB * x) &= AS_F \text{ mit } (x + \bar{x}) = 1 \\ \|AS_F\| &= \|(\overline{FB} * \bar{x}) \otimes (FB * x)\| \end{aligned}$$

Formel 5-20: Verknüpfung mittels gewichteter Multiplikation mit anschließender Normierung

Die Einflüsse können, ebenso wie die Parameter der Stabilität, noch um einen Index erweitert werden. Hintergrund dieser Erweiterung ist die Tatsache, dass der Einfluss des stabilisierenden Charakters nicht über die ganze Betrachtung identisch ist. Stattdessen soll er mit sinkendem Einfluss auf den Objektbetrieb abnehmen. Für jedes Niveau des petalen Einflusses ist daher ein individuelles x notwendig.

$$(\overline{FB}_i * x_j) \oplus (FB_i * \overline{x}_j) = AS_{F,i} \text{ mit } (x_j + \overline{x}_j) = 1$$

$$\|AS_{F,i}\| = \|(\overline{FB}_i * x_j) \oplus (FB_i * \overline{x}_j)\|$$

Formel 5-21: Verknüpfung mittels gewichteter, individueller Addition mit anschließender Normierung

Die Menge der Stabilitätsfaktoren muss die gleiche Kardinalität wie die Menge der Einschränkungen besitzen, es gilt $|M_S| = |M_E| = 4$. Die Menge wird mit den Faktoren x gewählt zu $M_S = \{x_0, x_1, x_2, x_3\}$, es ergibt sich ein Quadrupel, welches die Robustheit des Systems beschreibt. Ein Beispiel sei in Abbildung 5-20 gegeben, mit einer Robustheit von (90 %, 60 %, 30 %, 0 %).

Die Verknüpfungsfunktion, welche den Gesamteinfluss GE beschreibt, ist demnach eine Funktion in Abhängigkeit von Wirkung, Resultat und externer Beeinflussung, hier ausgedrückt durch die Wirkung W, die Einschränkung E und den Stabilitätsfaktor S. Sie entspricht einem Tripel. Die Elemente als Menge gleichen denen der Funktionseinheiten, ebenso die Kardinalität.

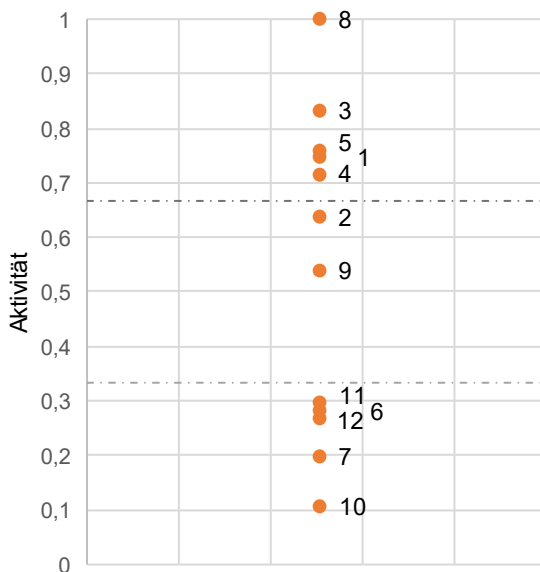


Abbildung 5-20: Verknüpfung mittels gewichteter, individueller Addition mit anschließender Normierung mit x von (90 %, 60 %, 30 %, 0 %)

Im Vergleich zur additiven Verknüpfung ohne Gewichtung lassen sich einige Unterschiede erkennen. Im Folgenden seien die beiden Varianten nebeneinander dargestellt. Die beiden größten Unterschiede sind hervorgehoben.

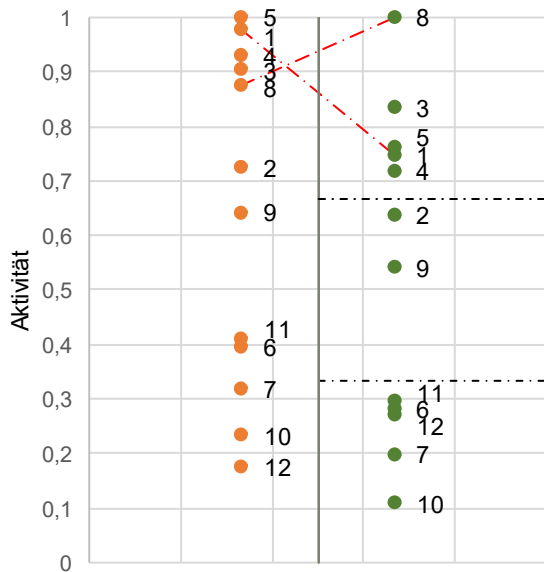


Abbildung 5-21:Gegenüberstellung der nicht gewichteten (rot) und gewichteten (grün) Addition

Im gegebenen Beispiel werden die Einflüsse durch die *Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen* (Punkt 8) stärker gewichtet, da diese den Funktionsbetrieb auf der gesamten Straße solcherart beeinflussen, dass es bei ihrem Wegfall zu einer Sperrung der Fahrbahn kommt. Der *Unterbau* (Punkt 1) sinkt dagegen in seinem Einfluss. Dieser ist zwar hoch (er befindet sich nach wie vor im oberen Orthant), ein Schaden zieht jedoch nicht automatisch eine Vollsperrung nach sich, wenngleich die Einschränkung vergleichsweise hoch ist.

In der folgenden Abbildung wird der Ursprung des gesamten Transformationsprozesses noch einmal zusammengefasst.

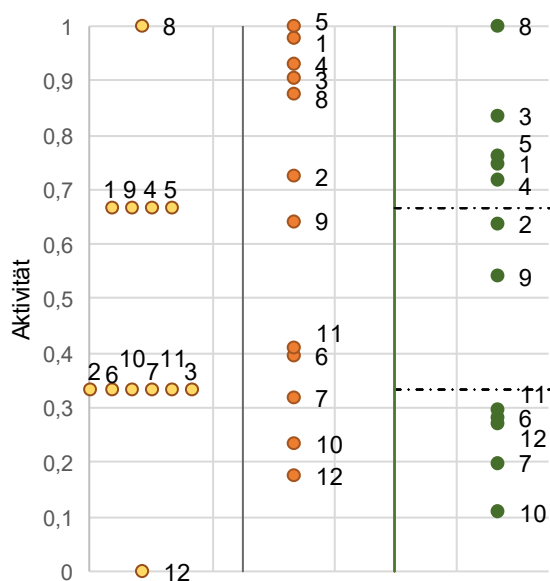


Abbildung 5-22: Gegenüberstellung der nicht gewichteten (rot) und gewichteten (grün) Addition vor dem Ursprung (gelb)

5.2.6 Ableitung einer Hierarchie

Die Hierarchie wird auf dem Gesamteinfluss aufgebaut. Menge und Kardinalität sind identisch. Entsprechend seiner Entstehung als Verknüpfung von petalem und fugalem Einfluss lässt sich der Gesamteinfluss in einer Abhängigkeit zwischen Aktiv- und Passivsumme darstellen. In der Vernetzungsanalyse ist dieses Resultat die Rollenallokation. Die folgende Abbildung zeigt eine solche Allokation verknüpfter Funktionseinheiten:

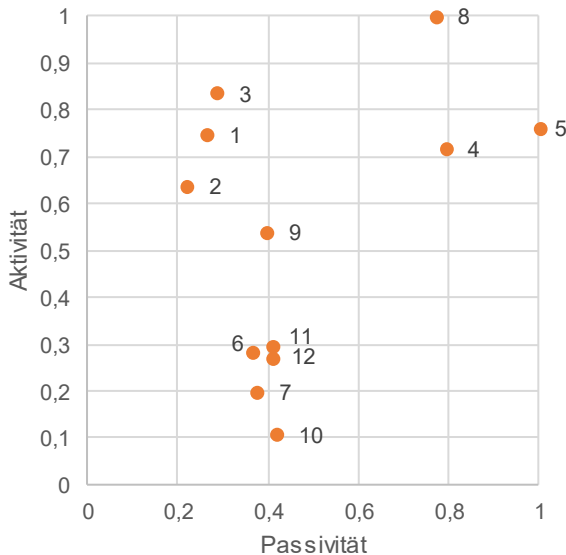


Abbildung 5-23: Darstellung der Verteilung der verknüpften Funktionseinheiten in aktive (vertikal) und passive (horizontale) Richtung

Im Rahmen der Vernetzungsanalyse würden nun die Parameter als kritisch gelten, die sowohl eine hohe Aktiv- als auch eine hohe Passivsumme aufweisen. In der Hierarchie wird diese zweidimensionale in eine eindimensionale übertragen. Die Hierarchie soll hier einer Monohierarchie, bei der einem Element nur ein Element übergeordnet ist, entsprechen. Eine Ausnahme ist nur gegeben, wenn ein Punkt mit einem anderen kongruent ist. Es handelt sich somit letzten Endes um eine Rangordnung. Dabei wird eine eindimensionale Anordnung nach dem Einfluss der Elemente erstellt. Ist dieser Einfluss, nach der Aktivsumme, mit dem eines anderen Elementes gleich, so kann jenes als höherrangig angesehen werden, welches den höheren Einfluss auf sich genießt (entsprechend der Vernetzungsanalyse) oder es wird auch hier von Kongruenz gesprochen. In letztem Fall würde die Passivsumme nicht als Parameter der Rangordnung verwendet, es handelt sich dann um die reine eindimensionale Anordnung.

Als kritisch gelten somit die Punkte, die auf der Skala die höchsten Werte enthalten. In der normierten Skala nahe der eins. Die kritische Eigenschaft der Punkte nimmt dann mit absteigendem Wert ab. Andere Begriffe, neben der *kritischen Eigenschaft*, sollen an dieser Stelle vermieden werden. Eine Rangordnung als eindimensionale Anordnung bezieht sich auf eine Eigenschaft, nicht auf mehrere. Ein Punkt nahe Null ist weniger *kritisch* als ein Punkt nahe Eins, es wäre dennoch irreführend, ihn als *unkritisch* zu bezeichnen. Auch auf die Bezeichnung

Kritikalität soll hier verzichtet werden, da diese später, bei der globalen Betrachtung, von Bedeutung ist.

So lässt sich die Monohierarchie bzw. Rangordnung aus den vorherigen Abbildungen nun zusammenfassen. Dabei steigt die kritische Eigenschaft (*Bedeutung*), die den Punkten innewohnt von links nach rechts an.

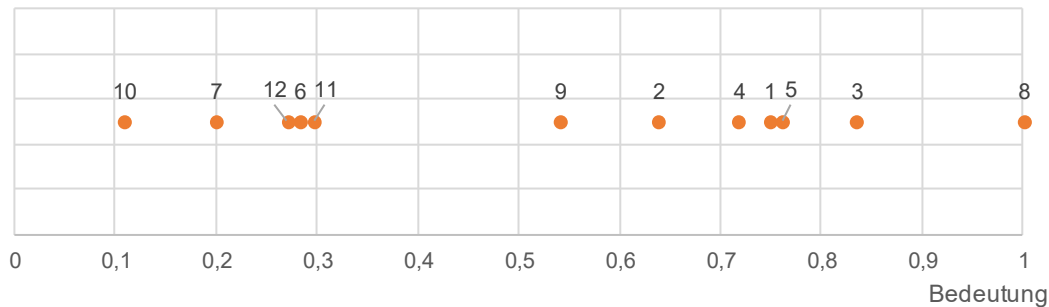


Abbildung 5-24: Darstellung der Rangfolge der Funktionseinheiten aufsteigend von links nach rechts

Die normierte Bedeutung lässt sich grafisch so darstellen, dass die Menge an kritischer Eigenschaft, die der Funktionseinheit innewohnt, die Bedeutung, ersichtlich ist. In der folgenden Abbildung ist die Bedeutung auf der Ordinate dargestellt, in aufsteigender Reihenfolge:

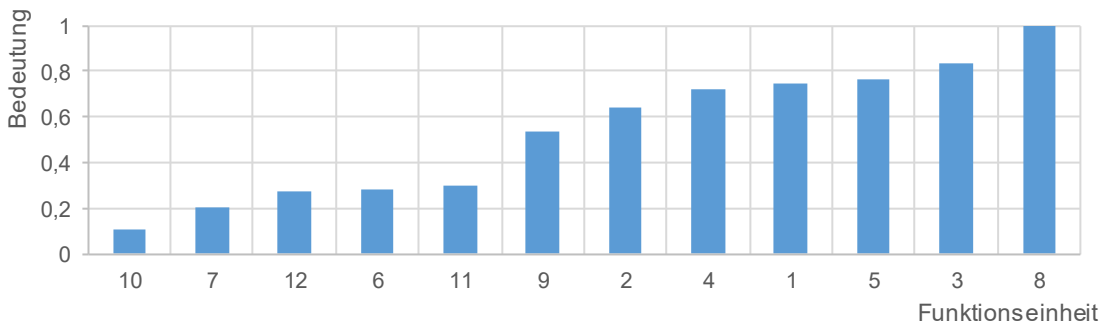


Abbildung 5-25: Darstellung der Bedeutung der Funktionseinheiten (aufsteigend sortiert)

Allgemein lässt sich somit die Bedeutung einer Funktionseinheit für den Funktionsbetrieb ordnen. Zudem sind quantifizierte, vergleichbare Aussagen möglich. Damit sind bereits zeitgleich erste qualifizierte Aussagen hinsichtlich des Aufwandes, den eine Funktionseinheit wert ist, möglich.

5.3 Definition von Kritikalität als Beurteilungskriterium einer gesamtwirtschaftlichen Instandhaltung

Für die öffentliche Hand, welche die Infrastruktur betreibt, muss für die Betriebsphase ganz allgemein gelten, dass all das, was erstellt wurde, auch funktionsfähig sein muss. Oder es muss entfernt bzw. rückgebaut werden. Es stellt sich dementsprechend nicht die Frage, ob etwas

instandgehalten werden muss, sondern ob es da sein muss. Existiert es, muss es (sofern es altert) instandgehalten werden. Und diese Instandhaltung muss effektiv und effizient geplant und ausgeführt werden. Wie bereits erwähnt wurde, sollte die Erhaltung der Infrastruktur nach dem Prinzip der Notwendigkeit angestellt werden. Das bedeutet eine Priorisierung und Selektion der einzelnen Projekte. Ein Sparsamkeitsprinzip muss, wenn überhaupt, dem Notwendigkeitsprinzip untergeordnet werden.

Im Folgenden soll die Instandhaltung als zeitlicher Aspekt beschrieben werden. Dabei soll eine hierarchische Struktur definiert werden, nach der sich die Maßnahmen der Instandhaltung verteilen. Diese Struktur wird auf die Anlage *Infrastruktur* angewendet.

Anschließend werden die Zusammenhänge der bereits vorgestellten Instandhaltungsstrategien hinsichtlich Kosten und Ausfällen qualitativ beschrieben. Dadurch sollen auch diese in eine Ordnung gebracht werden, die ordinale Aussagen ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund soll anschließend das Kritikalitätsmaß als maßgebender Parameter für die Zuordnung der Instandhaltungsstrategien verwendet werden. Das Ziel ist eine resultierende Strategie, eine Mischung aus den bekannten Strategien, die eine effiziente Instandhaltung vor dem Hintergrund der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Bedeutung darstellt.

5.3.1 Zeitliche Betrachtung der Instandhaltung

Maßnahmen der Instandhaltung tangieren in ihrer Realisierung ihre zugrundeliegende Betrachtungseinheit. Dabei kann der Tangens unterschiedlich stark ausgeprägt sein. Maßgebliche Einflussgrößen sind die Maßnahme selbst sowie die Betrachtungseinheit, an der die Maßnahme verrichtet wird. In der Betrachtung der Verfügbarkeit ist die zeitliche Komponente die entscheidende Messgröße. Dementsprechend sollen im Folgenden die zeitlichen Abläufe in einen kausalen Zusammenhang gesetzt werden. Die Begrifflichkeiten sind dabei so gewählt, dass sie, wo möglich, dem Wortlaut der DIN EN 13306 folgen.

5.3.1.1 Hierarchische Struktur im Anlagenbetrieb

Zur Beschreibung der zeitlichen Zusammenhänge soll im Folgenden von einer Intervallbetrachtung ausgegangen werden. Dieser liegt ein unbestimmtes Intervall zugrunde, welches sich zyklisch wiederholt. Innerhalb des Intervalls seien 5 Ebenen definiert, die sich hierarchisch gliedern.

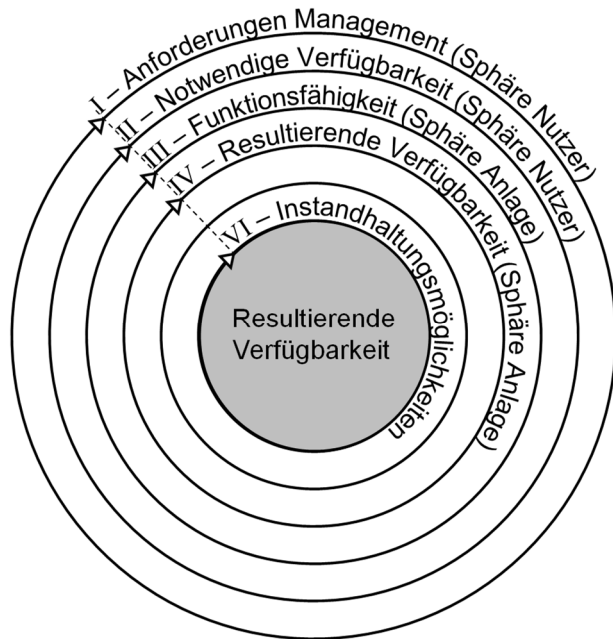


Abbildung 5-26: Allgemeine Form des Betriebskreises

In **Ring I** werden dabei die Anforderungen des Managements an die Anlage definiert. Diese sind von den individuellen Unternehmensprozessen abhängig. Sie entstammen der Sphäre des Nutzers (bzw. Betreibers) und stehen hierarchisch, da in dieser Betrachtung von einem Top-Down-Ansatz ausgegangen wird, an erster Stelle.

In **Ring II** wird die notwendige Verfügbarkeit für die Anlage aus den Anforderungen aus Ring I abgeleitet. Da er umgekehrt auch die Zeit angibt, in der die Anlage nicht verfügbar sein muss, stellt er die Grundlage späterer Instandhaltungsmöglichkeiten dar. Auch die notwendige Verfügbarkeit entstammt der Sphäre des Nutzers (bzw. Betreibers).

Ring III spiegelt die Funktionsfähigkeit der Anlage wider. Die Anforderung an die Funktionsfähigkeit ist das direkte Resultat an die notwendige Verfügbarkeit. Sie stellt dabei ihre Übersetzung in die Sphäre der Anlage dar. Gleichzeitig ist die Funktionsfähigkeit nur vom Charakter der Anlage abhängig, da trotz geforderter Verfügbarkeit ein Mangel dieser vorliegen kann.

Die resultierende Verfügbarkeit der Anlage wird in **Ring IV** dargestellt. Auch sie ist der Sphäre der Anlage zugeordnet. Sie ist das direkte Resultat der Ringe II und III. Vor allem als Resultat der Funktionsfähigkeit kann sie als Grundlage für die Instandhaltungsmaßnahmen dienen.

In **Ring VI** (Ring V ist nicht belegt) werden letztlich, basierend auf den Verfügbarkeiten, die eigentlichen Instandhaltungsmaßnahmen, bzw. allgemein der Prozess der Instandhaltung festgehalten, der sich nach den in Abschnitt 3.3.6 genannten Maßnahmen gliedert.

Basierend auf diesen Vereinbarungen lässt sich nun ein Instandsetzungs- bzw. Schadensfall konstruieren. Dieser tritt ein, wenn in Ring I aus der Sphäre des Nutzers eine geforderte Nutzungszeit vorliegt, gleichzeitig aber in Ring III aus der Sphäre der Anlage eine fehlende Funktionsfähigkeit vorliegt. Im Umkehrschluss gilt in diesem Fall, dass seitens des Nutzers eine (Still-)Standzeit (Ring II) in eine anlagenseitig nicht freie Zeit (Ring IV) fällt.

5.3.1.2 Zeitliche Zusammenhänge im Anlagenbetrieb

In der folgenden Abbildung ist der Funktionsbetrieb einer fiktiven technischen Anlage schematisch dargestellt. Die Darstellung erstreckt sich dabei über ein Intervall, welches theoretisch beliebig oft hintereinander gereiht werden kann. Die einzelnen Begriffe der verschiedenen Ebenen sollen im Folgenden auch hier entsprechend zur DIN EN 13306 bestimmt werden.

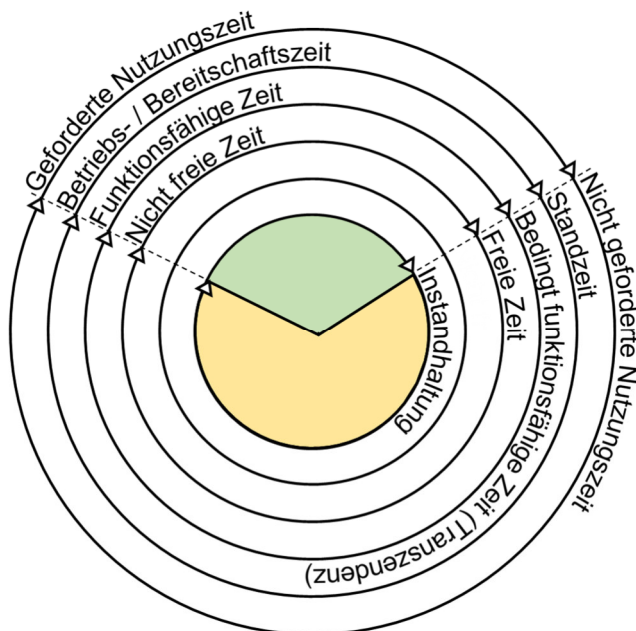


Abbildung 5-27: Sollbetrieb einer fiktiven technischen Anlage

Basierend auf den Anforderungen des Managements in Ring I ergibt sich die geforderte Nutzungszeit. In der Abbildung oben kann diese etwa als eine 8-Stunden-Schicht interpretiert werden. Die *geforderte Nutzungszeit* entspricht nach Norm jener Zeit, die es erfordert, dass sich eine Einheit in einem funktionsfähigen Zustand befindet.³³⁶ Den Rest der Zeit (in der Abbildung den 16 verbleibenden Stunden entsprechend) befindet sich die Anlage in der *nicht geforderten Nutzungszeit*. Als Gegenpart zur geforderten Nutzungszeit ist das jene Zeit, in der es nicht erforderlich ist, dass sich die Einheit in einem funktionsfähigen Zustand befindet.

³³⁶ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 19 Punkt 9.4.

Im Sollbetrieb entspricht die geforderte Nutzungszeit in Ring II der Betriebs- bzw. Bereitschaftszeit. Dabei ist die *Betriebszeit* die Zeitspanne, in der eine Einheit im Betriebszustand ist³³⁷ und die *Bereitschaftszeit* die Zeitspanne, in der sich eine Einheit im Bereitschaftszustand befindet.³³⁸ Da in der Phase der Bereitschaft ein Wechsel in den Betriebszustand jederzeit gewährleistet sein muss, ist eine Unterscheidung hinsichtlich der Instandhaltungsmaßnahmen nicht notwendig. Während der nicht geforderten Nutzungszeit befindet sich die Anlage in der Phase der *Standzeit*, der Zeit, in der sich die Einheit im Stillstand befindet.³³⁹

Durch die direkte Beziehung zwischen Ring I und Ring III lässt sich ableiten, dass sich die Anlage, wenn Nutzungszeit gefordert wird, im Sollbetrieb innerhalb der *funktionsfähigen Zeit* befindet und sie sich dementsprechend auch in einem funktionsfähigen Zustand befinden muss.³⁴⁰ Wird keine Nutzungszeit gefordert, wird sich die Anlage dennoch im funktionsfähigen Zustand befinden (solange keine Störung vorliegt), jedoch befindet sie sich nicht innerhalb der funktionsfähigen Zeit, sondern innerhalb der *bedingt funktionsfähigen Zeit*, in der es für den Zeitabschnitt selbst irrelevant ist, ob die Anlage funktionsfähig ist oder nicht.

Da während der funktionsfähigen Zeit der Anlage ein Betrieb abverlangt wird bzw. abverlangt werden kann, befindet sich die Anlage während dieser Zeit in der *nicht freien Zeit*. Das bedeutet, dass außerbetriebliche Maßnahmen an der Anlage nicht möglich sind, sofern sie den Betrieb, unabhängig davon auf welche Weise, stören würden. Während der Standzeit dagegen befindet sich die Anlage in der *freien Zeit*. Das bedeutet, dass zu dieser Zeit Maßnahmen der Instandhaltung, vorrangig Wartung und Inspektion, aber auch Verbesserungen an der Anlage durchgeführt werden können. Im Bereich der Instandsetzung wird diese Phase genutzt, um präventive Betriebsinstandsetzungen durchzuführen. Die *präventive Betriebsinstandsetzung* setzt auf vorbeugende Maßnahmen. Durch den Austausch vor dem Ausfall der Einheit soll die Betriebssicherheit sichergestellt werden. Die Einheit wird dabei nach einem gewissen Zeitraum, unabhängig von ihrem Zustand ausgetauscht.

Im Folgenden wird der Anlage eine *Störung* unterstellt, ein Zustand, der die Unfähigkeit der Anlage darstellt, die geforderte Funktion zu erfüllen.³⁴¹ Dabei findet die Störung während der geforderten Nutzungszeit statt.

³³⁷ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 19 Punkt 9.3.

³³⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 19 Punkt 9.5.

³³⁹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 19 Punkt 9.6.

³⁴⁰ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 19 Punkt 9.1.

³⁴¹ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 113 Punkt 6.8.

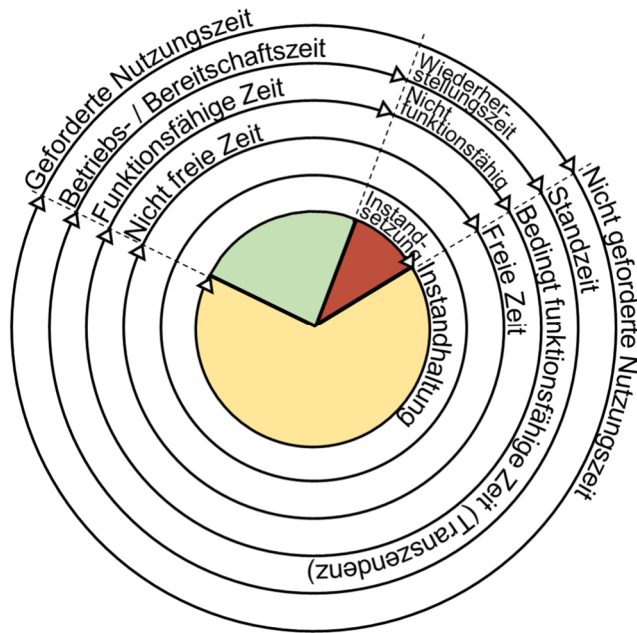


Abbildung 5-28: Istbetrieb einer fiktiven technischen Anlage

Durch die Störung während der geforderten Nutzungszeit ändert sich am Zustand der geforderten Nutzungszeit nichts. Allerdings sind ein Betrieb bzw. eine Bereitschaft nicht möglich. Es kommt zu einer unplanmäßigen Standzeit, einer *Wiederherstellungszeit*. Diese umschreibt die Spanne, in der sich die Anlage in einem anlagebedingten Stillstand befindet, der auf einen Ausfall der (Teil-)Anlage zurückzuführen ist.³⁴²

Während der Wiederherstellungszeit befindet sich die Anlage in der *nicht funktionsfähigen Zeit*. Diese ist das Resultat des Zustands des anlagenbedingten Stillstands.³⁴³

Da nun in Ring I aus der Sphäre des Nutzers (Betreibers) eine geforderte Nutzungszeit vorliegt, gleichzeitig aber in Ring III aus der Sphäre der Anlage eine fehlende Funktionsfähigkeit vorliegt (bzw. eine (Still-)Standzeit (Ring II) in eine anlagenseitig nicht freie Zeit (Ring IV) fällt), liegt ein Schadensfall vor, der eine außerplanmäßige, korrektive Instandsetzung erfordert. Während dieser Zeit, der *Instandsetzungszeit*, ist die Anlage aufgrund der aktiven korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen nicht verfügbar.³⁴⁴ Es handelt sich hierbei um eine reaktive Betriebsinstandsetzung. Die *reaktive Betriebsinstandsetzung* findet erst im Fall eines Defektes oder bei der Feststellung eines Defektes statt. Sie zielt auf die Entstörung des Defektes ab.

³⁴² Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 21 Punkt 9.21.

³⁴³ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 19 Punkt 9.2.

³⁴⁴ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 20 Punkt 9.11.

5.3.1.3 Sonderfall bei ständiger geforderter Nutzungszeit

Die Anforderungen an bestimmte Anlagen können derart andauernd sein, dass die geforderte Nutzungsdauer 100 % beträgt. Dies kann bspw. bei einer Anlage mit Schichtbetrieb der Fall sein, wenn drei 8-Stunden-Schichten einen Tag abbilden. Zwecks Instandhaltung werden dann in regelmäßigen Abständen Schichten ausgesetzt.

Einen anderen Fall stellen Infrastrukturobjekte dar. So können Straßen, Brücken und Tunnel in der Regel rund um die Uhr und täglich befahren werden. Entsprechend müssen Fahrbahn, Beleuchtung und andere Komponenten permanent, nicht nur aus Sicherheitsgründen, funktionsfähig sein. Instandhaltungen müssen hier während des Betriebs durchgeführt werden. Vor allem im Bereich von Instandsetzungen sind Einschränkungen bis hin zu Sperrungen oft unumgänglich.

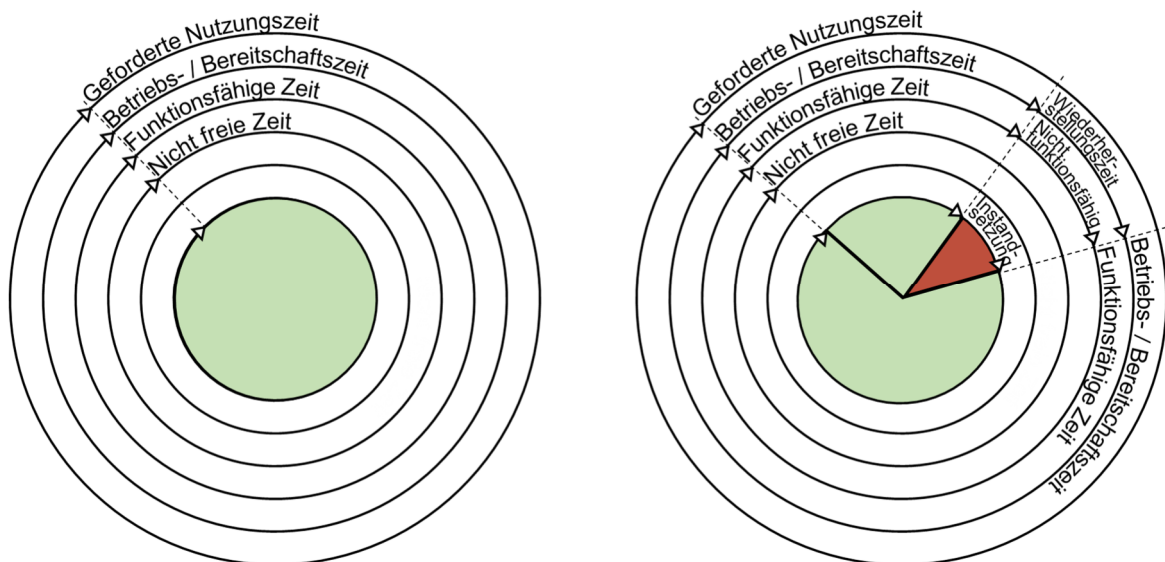


Abbildung 5-29: Betrieb bei permanent geforderter Nutzungszeit (rechts mit Störung)

In diesem speziellen Fall ist die uneingeschränkte Betriebszeit nicht ohne Abstriche realisierbar. Darum sind diese zu minimieren. Es werden hohe Anforderungen an die Instandhaltungsmaßnahmen gestellt, insbesondere an Wartung und Inspektion, da deren Beeinflussung auf den Regelbetrieb deutlich geringer ausfällt als die von Instandsetzungen. Auch Verbesserungen gewinnen in dieser Betrachtung an Bedeutung, wenn zukünftige Beeinträchtigungen durch instandhaltungsfreundlichere Objekte bzw. Komponenten reduziert werden können.

Diese beiden möglichen Anwendungsfälle der Betriebsinstandsetzung stellen unterschiedliche Ansätze für Instandsetzungsstrategien dar und damit auch im Bereich des Kosten- und Nutzenverhältnisses. Hier kommt es betriebswirtschaftlich zu einem vernunftwidrigen Effekt:

Die Ausfälle einer Einheit sinken bei der reaktiven Betriebsinstandsetzung gegenüber der präventiven Betriebsinstandsetzung, da bei ersterer die Lebensdauer (zulasten der Verfügbarkeit) überschritten, bei letzterer die Lebensdauer dagegen unterschritten wird. Es kommt folglich seltener zu Ausfällen und zu geringeren Instandhaltungskosten.³⁴⁵

Gleichzeitig werden aber höhere Verfügbarkeitsrisiken in Kauf genommen als bei aktiver Instandhaltung. Darüber hinaus ergibt sich die Ausfallzeit zu Anzahl der Ausfälle multipliziert mit der jeweiligen Ausfalldauer, die bei reaktiver Instandhaltung aufgrund der Reaktionszeiten höher ist.

Zudem muss neben den Kosten der Instandhaltung (bei Infrastrukturobjekten) auch der volkswirtschaftliche Schaden berücksichtigt werden. Beim Beispiel Verkehr wäre dieser von den Einschränkungen auf diese Gruppe abhängig. Zum einen ist hier die Ausfallzeit entscheidend, zum anderen die Auswirkungen während dieser. Aktive Instandhaltung in den Nachtstunden erzeugt dann einen geringeren volkswirtschaftlichen Schaden als reaktive Instandhaltung auf einen Ausfall im Berufsverkehr.

5.3.2 Zusammenhang der Instandhaltungsstrategien

Es ist nun wichtig zu erkennen, dass diese Vor- bzw. Nachteile gegenüber einer individuellen Betrachtungseinheit unterschiedlich wiegen. Würde man sich zur Instandhaltung ganzer Immobilienarten auf eine einzelne Strategie festlegen, würden sich sowohl die Vorteile als auch die Nachteile aufwiegen. Stattdessen muss für jede Betrachtungseinheit die für das Gesamtbild am besten geeignete Strategie identifiziert werden. Dabei soll die Gewichtung der Vorteile maximiert und die der Nachteile minimiert werden. Die folgende Abbildung zeigt qualitativ den Zusammenhang zwischen den beiden Parametern der Kosten der einzelnen Strategien im Hinblick auf die Instandhaltungsmaßnahmen und damit auch die Kosten für einzelne Komponenten auf der einen Seite, und die monetär bewerteten Folgen der Ausfallereignisse auf der anderen Seite. Dabei kann vor allem letzteres mitunter schwierig zu bewerten sein. Da es sich um eine qualitative Darstellung handelt, wäre es fatal, die möglichen Strategien auf der Abszisse anzutragen, da dies eine falsche Aussage implizieren würde.

³⁴⁵ Vgl. Zimmermann, Josef et al.: *INSP-EG. Instandsetzungsprognose für Empfangsgebäude – Schlussbericht* (Studie, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 2007), S. 24.

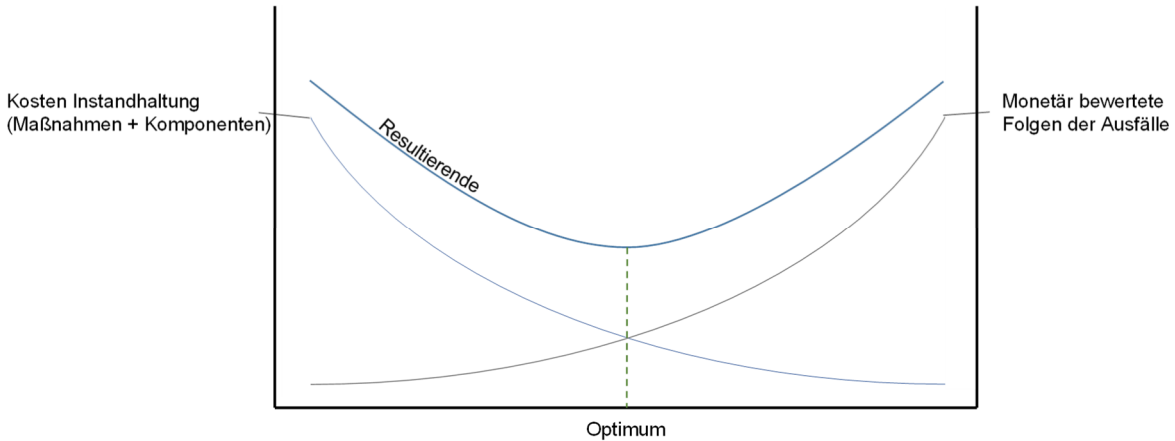


Abbildung 5-30: Qualitative Abhängigkeit zwischen den Kosten der Instandhaltung und den Ausfallfolgen

Generell lassen sich die vier Strategien mittels der folgenden Abbildungen nach vier Gesichtspunkten untersuchen. Zum einen zeigt sich, dass der Abnutzungsvorrat im korrektiven Bereich deutlich weiter ausgenutzt wird. Im aufgeschobenen Bereich durch die gegebenenfalls mögliche Ausnutzung abhängiger Vorräte noch weiter als bei der sofortigen (ein Beispiel wäre ein Straßenschaden: Statt diesen zu beseitigen, wird die erlaubte Geschwindigkeit reduziert). Die Ausfallzeit wie auch die Häufigkeit von (Folge-) Ausfällen verhält sich dabei genauso.

Die folgende Abbildung zeigt die Ausnutzung des Abnutzungsvorrats bei einer kumulierten Betrachtungseinheit, bspw. einer Beleuchtung. Wenn 97,5 % der Beleuchtung gefordert würde, würde das Potential rechts der Markierung (blau, rot und grün dargestellt) verschwendet, sofern die ausgetauschten Leuchtmittel nicht anderwärtig verwendet würden. Bei 50 % wäre es der Bereich rechts der entsprechenden Markierung (rot und grün dargestellt). Dabei lassen sich die einzelnen Instandhaltungsarten und -strategien nicht einfach auf die Darstellung anwenden, gewisse qualitative Zusammenhänge lassen sich jedoch erkennen.

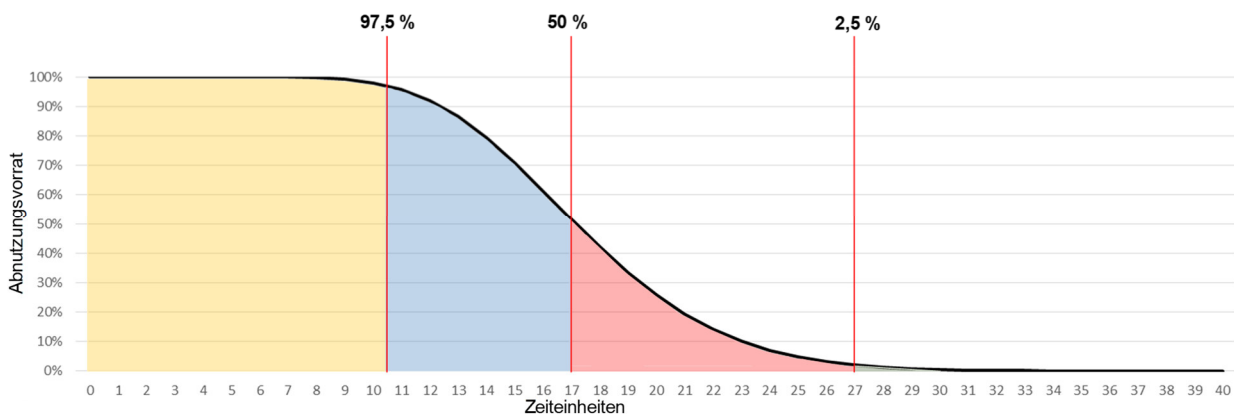


Abbildung 5-31: Restpotential in Abhängigkeit von der geforderten Zuverlässigkeit

Genau umgekehrt gegenüber der Ausnutzung des Abnutzungsvorrats verhält es sich dagegen mit der absoluten Maßnahmenhäufigkeit. So werden Maßnahmen (allen voran die Inspektion) bei

den vorbeugenden Maßnahmen häufiger durchgeführt als bei den korrektiven Strategien, die nur reagieren müssen. Analog dazu stehen Austauschraten für Komponenten und die dazugehörigen Kosten, da diese umgekehrt abhängig vom ausgenutzten Abnutzungsvorrat sind.

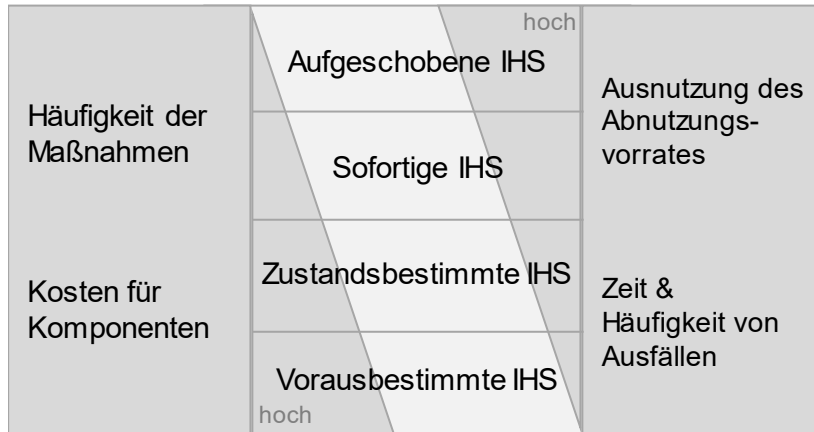


Abbildung 5-32: Vergleich der vier Strategien hinsichtlich vier Aspekten

Somit lässt sich festhalten, dass die wirtschaftlichste Instandhaltung jeweils jene ist, die das größtmögliche positive Defizit gegenüber den Kosten ihrer Unterlassung darstellt. Dabei muss neben den Instandhaltungskosten, deren Bestimmung betriebswirtschaftlich schon seit langer Zeit durchgeführt wird, vor allem auch der betriebs- und volkswirtschaftliche Schaden durch den Ausfall infolge der Instandhaltungsstrategie monetär bewertet werden, was vor allem für den volkswirtschaftlichen Anteil, der gerade im Bereich der Infrastruktur den Hauptteil ausmacht, eine gewisse Herausforderung darstellt.

Rückblickend lassen sich zwei Schlussfolgerungen zur Instandhaltung ableiten:

Schlussfolgerung 1:

Eine Instandhaltung ist effizient, wenn ihre Kosten, summiert mit dem Produkt aus der erlaubten Ausfallwahrscheinlichkeit und dem monetär bewerteten Schaden dieses Ausfalls bei Eintritt, minimal ist, d. h. keine günstigere Alternative möglich ist.

Schlussfolgerung 2:

Effiziente Instandhaltung ist nicht zwingend eine Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage bzw. das gesamte Objekt, sondern eine Mischung aus der jeweils effizientesten Strategie je Betrachtungseinheit, deren Ganzes die Anlage bzw. das Objekt darstellt.

5.3.3 Verknüpfung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Betrachtung

5.3.3.1 Herleitung eines Kritikalitätsmaßes

Zur Kritikalitätsbetrachtung werden die beiden Parameter, die sich aus der volkswirtschaftlichen Bedeutung einerseits und der einzelwirtschaftlichen Bedeutung aus den Einflüssen andererseits ergeben, in einer zweidimensionalen Verknüpfung miteinander verbunden.

Dazu wird die sozioökonomische Komponente in die eine Richtung, im Folgenden auf der Ordinate, und die einzelwirtschaftliche Komponente in die andere Richtung, im Folgenden auf der Abszisse, abgebildet. Die resultierende Form sei die **Kritikalitätsmatrix**.

Basierend auf dieser beabsichtigten Darstellungsform lässt sich die Kritikalitätsmatrix als euklidische Ebene annehmen. Es handelt sich um einen reellen, zweidimensionalen Vektorraum im rechtwinkligen kartesischen Koordinatensystem (\mathbb{R}^2). Infolgedessen können die Punkte, die einzelnen Funktionseinheiten, die als Elemente in der Kritikalitätsmatrix aufgenommen werden, als zweidimensionale Vektoren interpretiert werden. Diese werden durch x- und y-Werte ausgedrückt.

Der zweidimensionale **Kritikalitätsvektor** \vec{k}_e eines Elements e wird dementsprechend definiert zu

$$\vec{k}_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix}$$

Formel 5-22: Kritikalitätsvektor für eine zweidimensionale Kritikalitätsanalyse

wobei x den Wert der einzelwirtschaftlichen Komponente und y den Wert der sozioökonomischen Komponente repräsentiert. Die Kritikalitätsmatrix K ist dann die Menge aller Elemente in dieser Form.

Damit gilt für die Kritikalitätsmatrix K allgemein die Definition einer Matrix A

$$A = \{1, \dots, m\} \times \{1, \dots, n\} \rightarrow K$$

Formel 5-23: Definition der Kritikalitätsmatrix als doppelt indizierte Familie

mit den Zuordnungen der Elemente

$$(x, y) \rightarrow k ; (i, j) \rightarrow k_{ij}$$

Formel 5-24: Zuordnung der Elemente zu Vektoren als Indizes der Matrix

Daraus resultiert die Darstellung für K als Menge der Vektoren k und gleichzeitig als Menge der Elemente in der Form

$$\text{Für } K = \begin{pmatrix} \vec{k}_{11} & \dots & \vec{k}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \vec{k}_{m1} & \dots & \vec{k}_{mn} \end{pmatrix} \text{ mit } \vec{k}_{mn} = \begin{pmatrix} x_{mn} \\ y_{mn} \end{pmatrix} \text{ gilt } K = \begin{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{11} \\ y_{11} \end{pmatrix} & \dots & \begin{pmatrix} x_{1n} \\ y_{1n} \end{pmatrix} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \begin{pmatrix} x_{m1} \\ y_{m1} \end{pmatrix} & \dots & \begin{pmatrix} x_{mn} \\ y_{mn} \end{pmatrix} \end{pmatrix}$$

Formel 5-25: Kritikalitätsmatrix als Verallgemeinerung der Kritikalitätsvektoren

Die Komponenten der Vektoren sind in einem Intervall $(0, \dots, x)$ auf das Maximum normiert. Die Kritikalitätsmatrix weist dementsprechend in beide Richtungen die Länge x auf. Der maximale Abstand eines Punktes beträgt dadurch entsprechend dem Betrag des maximalen Vektors $\vec{k}_{max} = \begin{pmatrix} x \\ x \end{pmatrix} = \sqrt{2x^2}$. Die Elemente, dargestellt durch die Kritikalitätsvektoren, werden im nächsten Schritt erneut auf das Maximum normiert, das bedeutet mit $\sqrt{2x^2}$. Es gilt

$$\|\vec{k}_e\| = \frac{\|\vec{k}_e\|}{\|\vec{k}_{max}\|} = \frac{\|\vec{k}_e\|}{\|\sqrt{2x^2}\|}$$

Formel 5-26: Allgemeiner normierter Kritikalitätsvektor einer zweidimensionalen Kritikalitätsanalyse

wobei allgemein gilt

$$\vec{k}_{max} = \max(\vec{k}_{ij}) = \max(\vec{k}_{11}, \dots, \vec{k}_{mn})$$

Formel 5-27: Definition des maximalen Kritikalitätsvektors

Die Komponenten der Vektoren im Rahmen der hier angeregten Betrachtungen sind im Intervall $(0, \dots, 1)$ auf das Maximum normiert. Die Kritikalitätsmatrix weist daher in beide Richtungen die Länge 1 auf und der maximale Abstand eines Punktes beträgt dadurch $\vec{k}_{max} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \sqrt{2}$. Die erneute Normierung auf das Maximum erfolgt daher mit $\sqrt{2}$. Es gilt

$$\|\vec{k}_e\| = \frac{\|\vec{k}_e\|}{\|\vec{k}_{max}\|} = \frac{\|\vec{k}_e\|}{\|\sqrt{2}\|}$$

Formel 5-28: Normierter Kritikalitätsvektor einer zweidimensionalen Kritikalitätsanalyse

Das hat zur Folge, dass der betragsmäßig größte vorkommende Vektor den Betrag 1 aufweist, was zugleich der maximale Abstand innerhalb der **normierten Kritikalitätsmatrix** ist.

$$\|K\| = \begin{pmatrix} \frac{\|\vec{k}_{11}\|}{\|\vec{k}_{max}\|} & \dots & \frac{\|\vec{k}_{1n}\|}{\|\vec{k}_{max}\|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\|\vec{k}_{m1}\|}{\|\vec{k}_{max}\|} & \dots & \frac{\|\vec{k}_{mn}\|}{\|\vec{k}_{max}\|} \end{pmatrix}$$

Formel 5-29: Darstellung der normierten Kritikalitätsmatrix

Für das **Kritikalitätsmaß** ergibt sich somit ein Wert k im Kritikalitätsintervall

$$[0,1] = \{x \in R \mid 0 \leq x \leq 1\}$$

Formel 5-30: Kritikalitätsintervall des Kritikalitätsmaßes

Diese zweidimensionale Betrachtung lässt sich beliebig erweitern. Eine dreidimensionale Betrachtung erfordert bspw. das Hinzufügen eines weiteren Aspekts, der dann auf einer Implikate dargestellt wird. Höher dimensionierte Betrachtungen sind selbstverständlich möglich, wengleich deutlich schwerer darzustellen.

5.3.3.2 Qualitative Diskussion des Maßes

Werden die untersuchten Parameter, in der zweidimensionalen Betrachtung die volkswirtschaftliche (Ausfall-)bedeutung (Ordinate) und die objektspezifische bzw. einzelwirtschaftliche Ausfallbedeutung (Abszisse), in orthogonalem Verhältnis zueinander aufgetragen, so lassen sich die Elemente, wie definiert, als zweidimensionale Koordinaten darstellen. Zudem sind beide Parameter für sich individuell normalisiert. Daher definiert sich für beide Parameter das (individuelle) Intervall von 0 bis 1 und es gilt die folgende Darstellung:

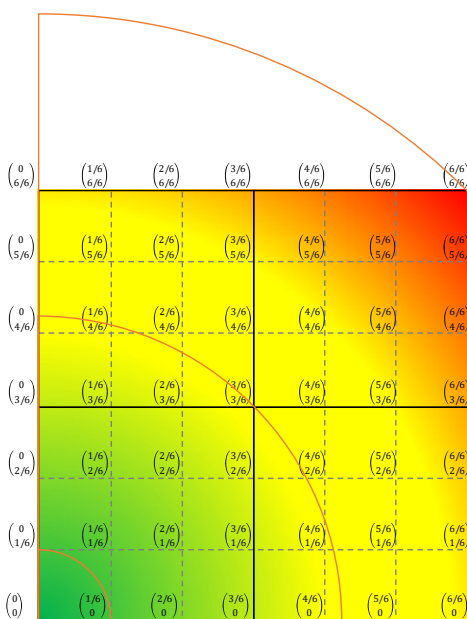


Abbildung 5-33: Koordinatenform der (nicht normierten) Kritikalitätsmatrix

Die Viertelkreise deuten dabei jene Linien an, die von Punkten gleichen Abstandes zum Ursprung (analog des Kritikalitätsmaßes) erzeugt werden. Linien außerhalb der Matrix, wie exemplarisch für den Abstand 1 dargestellt, sind dabei nicht zulässig, sie sind entsprechend nur innerhalb der allgemeinen Matrixdarstellung definiert.

Die folgende Abbildung verdeutlicht diese Abstandsbeziehungen innerhalb der Matrix. Für die charakteristischen Punkte, die beispielhaft in den sechstel-Abschnitten der Matrix liegen sollen, lassen sich im gegebenen Intervall folgende Abstände ableiten:

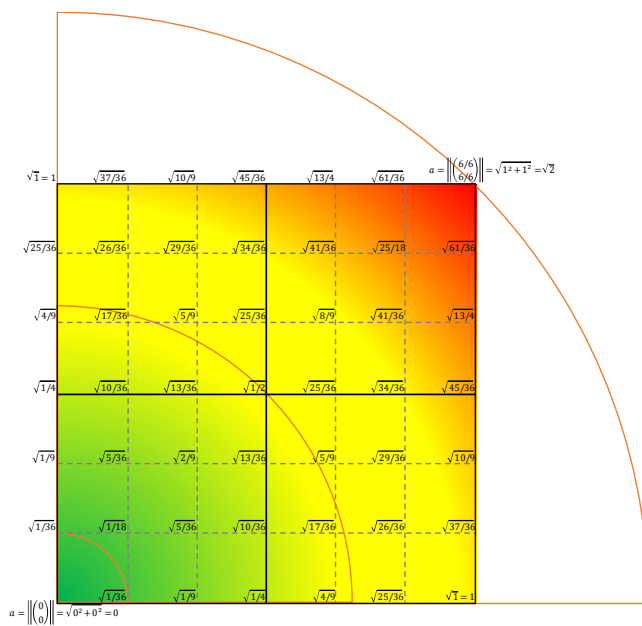


Abbildung 5-34: Abstandsbeziehungen zum Ursprung in der (nicht normierten) Kritikalitätsmatrix

Die Punkte gleicher Abstände ergeben jeweils Kreise (zweidimensionale Kugeln) mit einem entsprechenden Radius. Für höher dimensionierte Betrachtungen entsprechend (Hyper-)Kugeln.

Wird nun die Matrix selbst normiert, sodass sich für das Maximum im ursprünglichen Punkt (1,1) der Betrag 1 ergibt, so verändern sich die charakteristischen Punkte zu den Werten der folgenden Abbildung. Dabei wurden die quantitativen Werte um qualitative Bewertungen (niedrig, hoch) erweitert.

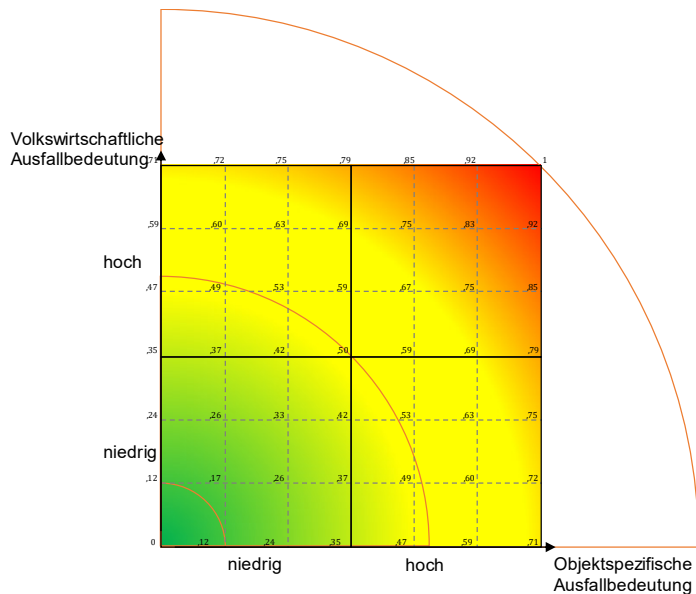


Abbildung 5-35: Abstandbeziehungen zum Ursprung in der normierten Kritikalitätsmatrix

5.3.3.3 Interpretation des Kritikalitätsmaßes

In der normierten Kritikalitätsmatrix wird Elementen ein eindeutiger reeller Wert zwischen 0 und 1 zugeordnet. Dies erlaubt bspw. eine prozentuale Interpretation. Zudem sind die Abstände zwischen Elementen echt, d. h. ein doppelter Wert entspricht einem doppelten Kritikalitätsmaß. Somit sind auch Wertungen auf Basis von Beziehungen untereinander möglich. Dies ermöglicht wertende Aussagen in Form von Faktorisierungen.

Durch den Aufbau der Matrix werden bei gegebenem Einfluss aus der Vernetzung der Funktionseinheiten, der objektspezifischen Betrachtung, die wirtschaftlichen Einflüsse aufsteigend sortiert, bzw. umgekehrt bei gegebenem wirtschaftlichem Einfluss die Einflüsse innerhalb der Funktionseinheiten des Objekts geordnet abgebildet. Diese Ordnung, als zweidimensionale Darstellung der Einflüsse und Bedeutung im gemeinsamen Intervall, ermöglicht es, die eindeutige ordinale Relation zwischen Elementen zu bestimmen.

Die resultierenden Werte des Kritikalitätsmaßes lassen sich hinsichtlich der Bedingungen an die Verfügbarkeit der Objekte interpretieren. Denn Maßnahmen, Anwendungen, Prozesse, und ähnliches, die das Objekt tangieren, können so in eine Relation gesetzt werden. Das ist vor allem für die Instandhaltung interessant.

So lässt sich z. B. eine Relation zwischen Planbarkeit und Verfügbarkeit annehmen. Diese besagt dann, dass eine höhere Verfügbarkeit eines Objektes mit einer höheren Planbarkeit der Maßnahmen, Anwendungen, Prozesse, etc. korreliert. Je besser die Planbarkeit ist, desto eine höhere Verfügbarkeit lässt sich garantieren. Das liegt nicht zwingend an den Prozessdauern, sondern vielmehr an der Wahl des Zeitpunktes. Für das Kritikalitätsmaß bedeutet das, dass ein höheres Maß eine höhere Anforderung an die Planbarkeit impliziert, ebenso wie an die

Verfügbarkeit. Weitere Parameter bspw. zeitlicher Natur, die mit dem Kritikalitätsmaß korrelieren, sind denkbar.

Für sämtliche Maßnahmen, Prozesse, etc. gilt zudem, dass, je aufwendiger sie sind, desto höher der Gewinn ist, wenn die ordinale Beziehung der Elemente, das Kritikalitätsmaß, berücksichtigt wird, da dann das Erkennen und Nutzen optimaler Zeitpunkte stärker priorisiert wird und Synergieeffekte im Fokus stehen.

Neben Aussagen hinsichtlich der verlangten Instandhaltungsstrategie oder anderen Maßnahmen und Prozessen können beliebige qualitative und quantitative Aussagen hinsichtlich des Kritikalitätsmaßes getätigt werden. So kann bspw. die Kritikalität einer beliebigen spezifischen Funktionseinheit (BAB x_1 ; FE y_1) gegenüber einer anderen (BAB x_2 ; FE y_2) durch den Quotienten $(\text{BAB } x_1; \text{FE } y_1) / (\text{BAB } x_2; \text{FE } y_2)$ ausgedrückt werden. Das führt zu einer Aussage „(BAB x_1 ; FE y_1) ist $[(\text{BAB } x_1; \text{FE } y_1) / (\text{BAB } x_2; \text{FE } y_2)]$ mal so kritisch wie (BAB x_2 ; FE y_2)“. Analog sind andere logische Aussagen möglich.

5.4 Genese von Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität

Ähnlich dem Abnutzungsvorrat einer Funktionseinheit, der sich mit der Zeit bzw. mit Benutzung verringert, verhält es sich mit dem Nutzen, den eine Funktionseinheit dem Funktionsbetrieb stiftet. Mit dem Zeitpunkt des Ausfalls beginnend wird die Funktionseinheit keinen Nutzen mehr stiften, wobei der Ausfallzeitpunkt das Ergebnis eines stochastischen Prozesses ist. Der Zeitpunkt kann statistisch genähert werden und über Wahrscheinlichkeiten abgeschätzt werden, er kann jedoch nicht bestimmt werden. Analog zum Abnutzungsvorrat lässt sich dementsprechend ein Nutzenvorrat oder besser ein Nutzenpotential einer funktionsfähigen Funktionseinheit annehmen.

Analog zu Abbildung 5-31 lässt sich das Nutzenpotential als Restpotential verstehen, welches der Einheit innewohnt. Damit gelten auch die weiteren Aussagen uneingeschränkt. Vor allem Abbildung 5-32 lässt sich mit diesem Wissen erweitern. So wie die Ausnutzung des Abnutzungspotentials mit Häufigkeit der Maßnahmen und der Häufigkeit der Ausfälle verknüpft ist, lässt sich auch der Nutzenverlust verknüpfen. Dabei gilt, dass der prognostizierte Nutzenverlust eines Objektes bei gleichen Bedingungen bei der aufgeschobenen Instandhaltung am höchsten ist, bei der vorausbestimmten am geringsten. Entsprechend Schlussfolgerung 1 bedeutet das, dass je größer der monetär bewertete Schaden eines Ausfalls ist, desto größer der Aufwand, der in die Verhinderung investiert werden kann, ist.

Das Kritikalitätsmaß ist nun dasjenige Werkzeug, das die Grenze zieht, bis zu welchem Punkt die einzelnen Strategien den anderen vorzuziehen sind. Aufgeschobene, sofortige, zustandsbestimmte und vorausbestimmte Instandhaltungen erzeugen in dieser Reihenfolge aufsteigend geringere Nutzenverluste, bzw. geringere volkswirtschaftliche Schäden.

Dementsprechend lassen sie sich wie in der folgenden Abbildung hierarchisch gliedern und mit dem Kritikalitätsmaß verknüpfen. Zwischen den einzelnen Strategien sorgen zu definierende Grenzen für die Unterscheidung. Ist das Maß hoch, so entfaltet die vorausbestimmte Instandhaltung ihre Vor- und Nachteile gegenüber einem größeren potentiellen Nutzenverlust. Gerade die Nachteile, mit denen die Vorteile „erkauft“ werden, werden dem Nutzen der Strategie gegenübergestellt. Ist das Kritikalitätsmaß geringer, so überwiegen diese Nachteile qualitativ gesehen dem Nutzen. Daher wird hier die zustandsbestimmte Instandhaltung angewendet. Mit sinkendem Kritikalitätsmaß sinkt die Qualität der Instandhaltung hinsichtlich Verfügbarkeit weiter ab, bis zur aufgeschobenen Instandhaltung.

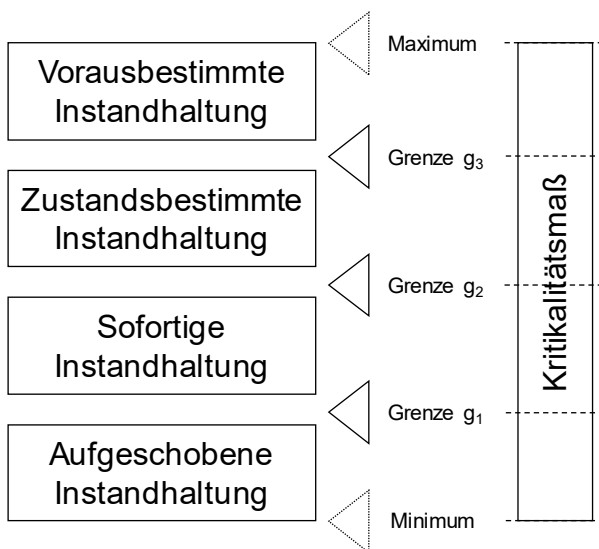


Abbildung 5-36: Zusammenhang zwischen Instandhaltungsstrategie und Kritikalitätsmaß

Die Wahl der Grenzen und damit die Abgrenzung der Anwendung der einzelnen Strategien ist von verschiedenen Aspekten abhängig. Allein auf volkswirtschaftlicher Basis ist es nicht möglich, diese festzulegen, da unter anderem die Kosten (eine betriebswirtschaftliche Messgröße) bzw. deren Struktur hinsichtlich der Strategien notwendig sind. Zudem wird eine Abschätzung der verfügbaren Mittel benötigt, da das Verhältnis der Mittel zu den Kosten einen essentiellen Faktor darstellt. Mit anderen Mitteln kann ein Szenario *ceteris paribus* nicht auf gleichem Wege die gleiche Effizienz erfahren.

Unter der Annahme der vier aufgezeigten Instandhaltungsstrategien werden im Weiteren Grenzen bestimmt. Diese Grenzen können nur als Vorschläge verstanden werden, da die notwendigen Informationen nicht vollständig bekannt sind. Die ganzheitliche Betrachtung der Instandhaltung benötigt, wie bereits zu Beginn beschrieben, Kenntnis der gesamten volkswirtschaftlichen und betriebswirtschaftlichen Informationsbreite. Auf die daraus folgende Strategiegengese wird in Kapitel 6.4.1 eingegangen. Wird im volkswirtschaftlichen Bereich die Kritikalität als eine Auswirkung der Instandhaltung auf den Nutzen betrachtet, so ist die Auswirkung als Kostenfunktion der Instandhaltung auf den Lebenszyklus (und damit die

Verfügbarkeit) das betriebswirtschaftliche Pendant dazu. Erst unter Berücksichtigung beider Auswirkungen ergibt sich ein gesamtwirtschaftlicher Ansatz zur Instandhaltung.

Die Grenzwahl ist in der volkswirtschaftlichen Betrachtung vom resultierenden Nutzendefizit zwischen den unterschiedlichen Instandhaltungsarten abhängig. Es handelt sich demzufolge um eine Verfügbarkeitsfrage. Betriebswirtschaftlich gesehen ist sie dagegen von den kumulierten Kosten abhängig, die durch die unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien entstehen. Gesamtwirtschaftlich müssen nun beide Bereiche Berücksichtigung finden. Würden ausschließlich die volkswirtschaftlichen Interessen berücksichtigt, so würde stets die Strategie entsprechend der besten Verfügbarkeit gewählt. Würde umgekehrt nur der betriebswirtschaftliche Aspekt berücksichtigt, so würde nur jene Strategie gewählt, welche die geringsten kumulierten Kosten mit sich bringt. Die Grenzen können dementsprechend nur gewählt werden, wenn beide Bereiche hinreichend untersucht sind und im betriebswirtschaftlichen Bereich auch die verfügbaren Mittel bekannt sind.

Zur exemplarischen Auswertung der Kritikalität in Bezug auf eine Instandhaltungsplanung soll die Menge an Kritikalitätsmaßen als Grundlage einer Stichprobe verstanden werden. Die Spaltenvektoren der Kritikalitätsmatrix werden dazu miteinander verknüpft. So wie nun 3 bzw. 5 Grenzwerte benötigt werden (vgl. Abbildung 5-36), kann die Stichprobe mit 3 bzw. 5 geteilt werden. Bei einer fünffachen Teilung ergeben sich gegenüber der dreifachen Teilung lediglich Minimum und Maximum als zusätzliche Grenzen. Die Grenzen können nun als Quantile der Probe verstanden werden. Die Teilung in Quantile entspricht dabei der geforderten Anzahl. Die drei „echten“ Grenzen entsprechen dann dem 0,25-Quantil, dem 0,5-Quantil (Median) und dem 0,75-Quantil. Die beiden „unechten“ Grenzen entsprechen dem Minimum und dem Maximum.

Somit erweitert sich Abbildung 5-36 und es gilt:

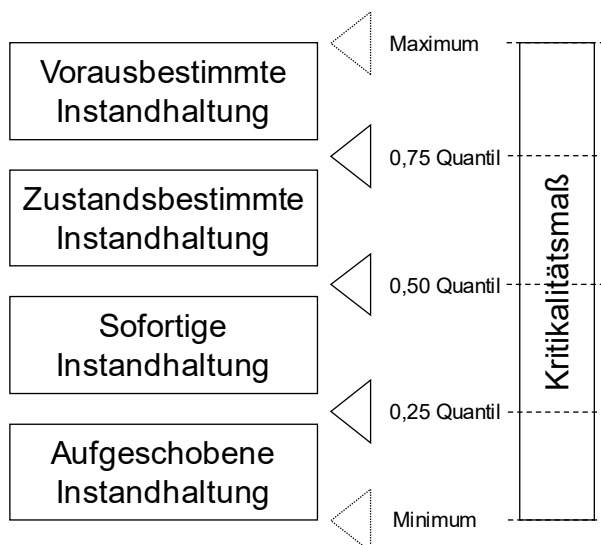


Abbildung 5-37: Darstellung der Quantile als Grenzen der Instandhaltung innerhalb des Kritikalitätsmaßes

Zudem lassen sich die Instandhaltungsstrategien durch die Grenzen interpretieren, sodass gilt:

vorausbestimmte IHS > 0,75 Quantil
zustandsbestimmte IHS > 0,50 Quantil; ≤ 0,75 Quantil
sofortige IHS > 0,25 Quantil; ≤ 0,50 Quantil
aufgeschobene IHS > 0,00 ; ≤ 0,25 Quantil

Formel 5-31: Interpretation der Instandhaltungsstrategien durch Quantile als Grenzwerte

Die Strategien lassen sich in der Matrixdarstellung zur besseren Übersicht farblich darstellen. Die Farbwahl basiert dabei auf der Kritikalität. Das bedeutet, die vorausbestimmte Instandhaltungsstrategie wird in Rot dargestellt, da die Funktionseinheiten am kritischsten sind. Die zustandsbestimmte Instandhaltung wird in Orange dargestellt, die sofortige in Gelb und die aufgeschobene, bei der die Objekte, die ihr unterliegen, am unkritischsten sind, in Grün. Die Abbildung 5-36 sowie die Abbildung 5-37 lassen sich um diese Farbdefinitionen erweitern.

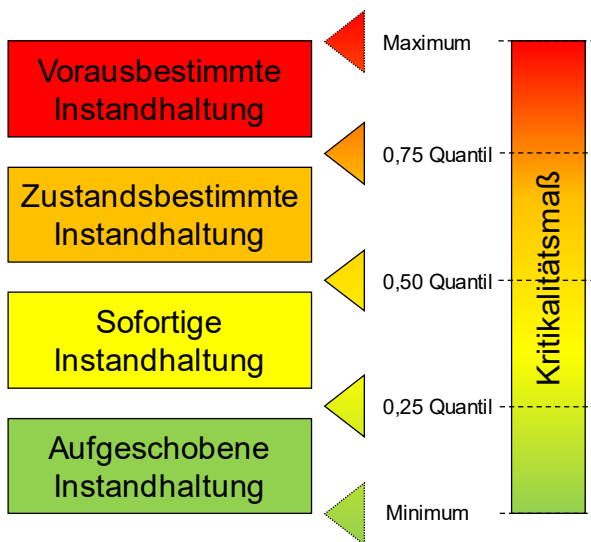


Abbildung 5-38: Farblicher Zusammenhang innerhalb der Grenzen der Instandhaltung innerhalb des Kritikalitätsmaßes

Es lassen sich zwei Verfahren anwenden, um das Kritikalitätsmaß (und damit die Grenzen der Instandhaltungsstrategien) zu bestimmen. Zum einen auf Basis der wirtschaftlichen Bedeutung des untersuchten Bereichs. Dieser kann mit den notwendigen Informationen immer und jederzeit bestimmt werden. Zum anderen mithilfe der Ausfallbedeutung. Diese lässt sich dann anwenden, wenn mindestens zwei konkrete Objekte oder Zustände untersucht werden sollen. Sie betrachtet dementsprechend nur ein einzelnes Objekt, während mit der wirtschaftlichen Bedeutung gleich der gesamte untersuchte Bereich mit allen Objekten in Relation gesetzt wird.

6 Modellentwicklung und Ableitung eines Instandhaltungsmanagements auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte

6.1 Nutzen von Verkehr als sozioökonomischer Aspekt

In den folgenden Abschnitten wird ein (Teil-)modell entwickelt, welches in der Lage ist, den Nutzen von Verkehr zu beschreiben. Dazu wird an etablierten Analysemethoden angeknüpft und eine Weiterentwicklung durchgeführt.

Das Modell weist immer auch Schnittstellen zur Außenwelt auf, da es ohne Informationen von außen keinen praktischen Nutzen erzeugen kann. Es ist auf die Beschreibung der Außenwelt angewiesen. Wie in Kapitel 1.1 intendiert und in Kapitel 5.1 beschrieben, ist die Bedingung die Quantifizierbarkeit des Funktionsbetriebes, was volkswirtschaftlich für diverse Sparten der Infrastruktur möglich ist. Das Modell ist abseits der Schnittstellenanpassung das gleiche, die wissenschaftliche Herleitung daher nur einmal notwendig und wird hier am Beispiel der Bundesautobahnen mit den hergeleiteten Methoden durchgeführt.

6.1.1 Bewertung der wirtschaftlichen Ausfallbedeutung eines Objektes

Um die wirtschaftliche Bedeutung eines betrachteten Objekts i zu bestimmen, wird der Nutzen, der dem Objekt innewohnt, verwendet. Dabei wird der negative Nutzen (der Schaden), der entsteht, wenn das Objekt ausfällt oder nur eingeschränkt zur Verfügung steht, bestimmt. Das betrachtete Objekt wird dabei als Bestandteil eines Streckenabschnitts aufgefasst, in dem es liegt. Der Streckenabschnitt beginnt und endet jeweils an einem charakteristischen Punkt. Diese Punkte können bspw. die in beide Richtungen jeweils nächsten Zählstellen sein. Zudem sollten die Punkte so gewählt werden, dass der repräsentierte Streckenabschnitt möglichst frei von Zu- und Abflüssen des Verkehrsstroms ist.

Den Verkehrsteilnehmern kann dann unterstellt werden, dass sie von einem der beiden Punkte zum jeweils anderen wollen und, unter Berücksichtigung der Einschränkung, gegebenenfalls eine andere Route wählen. Diese möglichen Routen werden als Alternativen bestimmt.

Sind der betrachtete Streckenabschnitt definiert und die Alternativen festgelegt, kann das resultierende Teilsystem bspw. als Netz oder Graph dargestellt werden. Entsprechend der Kanten, durch die Strecken repräsentiert, werden Kreuzungen und Messpunkte als Knoten berücksichtigt. Mithilfe der festgelegten Formeln und Kennwerte kann der Nutzen, der durch den Verkehr im Teilsystem erzeugt wird, bestimmt werden.

Das zu untersuchende Objekt, repräsentiert durch seine Funktionseinheiten, kann in seiner Funktion nun durch verschiedene „Ausfallereignisse“ beeinträchtigt werden. Jedes Ereignis ruft dabei eine Folge hervor, die sich negativ auf den Nutzen des Systems auswirkt.

Um nun ein potentielles Ausfallereignis zu untersuchen, werden die Folgen dieses Ereignisses sowohl für den repräsentierten Streckenabschnitt als auch für die Alternativen bestimmt und erneut eine Berechnung des Nutzens des Systems angestellt. Anschließend wird die Differenz gebildet und somit der Nutzen der Einschränkung des Objektes i durch die Ausfallfolge bestimmt. Dieser wird im Allgemeinen ein negatives Vorzeichen besitzen, weshalb es sich um einen negativen Nutzen (einen Schaden) handelt.

Um die wirtschaftliche Bedeutung des Objektes i zu bestimmen, müssen nun die Nutzendefizite der möglichen Ausfallfolgen ermittelt und addiert werden. Dann ergibt sich die wirtschaftliche Bedeutung zu:

$$\text{wirtschaftliche Bedeutung} = \sum_{j=0}^n |\Delta \text{Nutzen}_j|$$

Formel 6-1: Wirtschaftliche Bedeutung als Summe der Nutzendefizite

Im Folgenden ist der Ablauf dargestellt. Daraus wird auch deutlich, dass eine gleiche Ausfallfolge Resultat verschiedener Ausfallereignisse sein kann. Dieser Sachverhalt ist später vor dem gesamtwirtschaftlichen Hintergrund wichtig sowie auch allgemein, da er zeigt, dass sich eine einfache Konzeption eines Objektes positiv auf die Zahl von Funktionseinheiten auswirkt und damit die Komplexität der Instandhaltung reduziert wird.

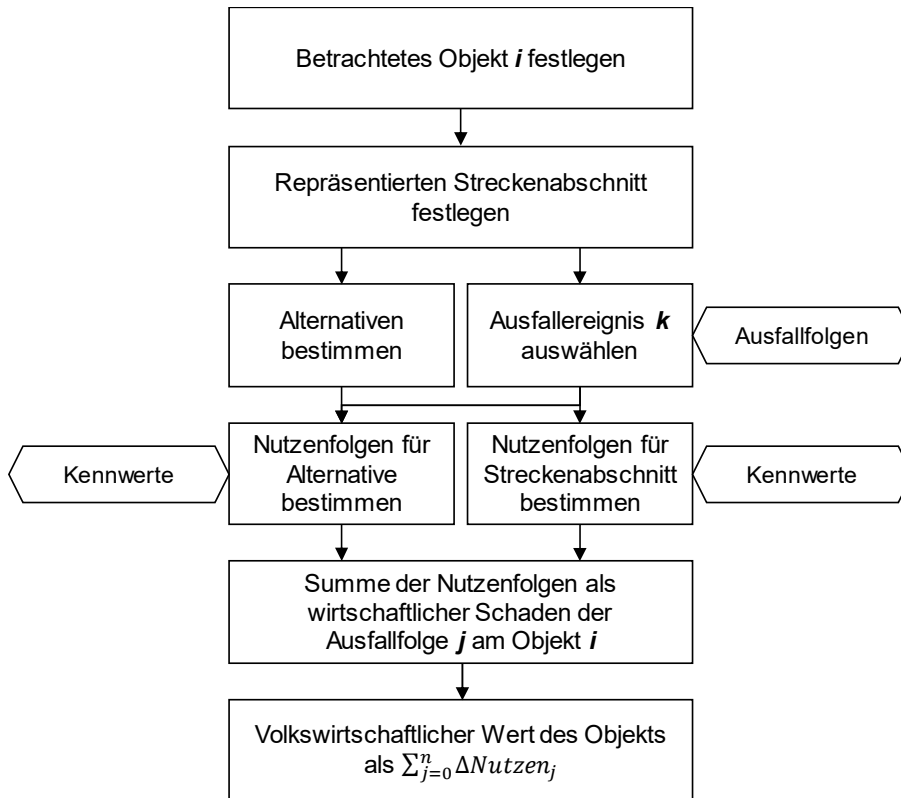


Abbildung 6-1: Allgemeines Vorgehen zur Bewertung der Ausfallbedeutung eines Objektes

Die wirtschaftliche Bedeutung eines Objektes ergibt sich folglich aus dem Schaden, der durch seine Einschränkung, in Form der Ausfallfolgen, entsteht. Im Allgemeinen, ohne Berücksichtigung von Fahrzeuggruppen, ergibt sich der Schaden qualitativ aus der Menge der Fahrzeuge, die eingeschränkt werden, multipliziert mit der zusätzlichen Länge bzw. zusätzlichen Zeit, die sie zur Bewältigung der Einschränkung aufbringen müssen.

6.1.1.1 Statische Bewertung

Wird das Verhalten der Verkehrsteilnehmer hinsichtlich der Auswahl einer Ausweichroute statisch bewertet, so wird die Wechselwirkung zwischen den Routen nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass sich die Verkehrsteilnehmer so auf die Routen verteilen, dass deren Auslastung ungefähr gleich ist, da dort der empfundene Fahrfluss am angenehmsten erscheint. Erst bei größeren Unterschieden in der Länge der Alternativen wird die Wahl maßgeblich von dem Umstand beeinflusst, das Ziel schneller erreichen zu wollen.

Hinsichtlich der Verteilung des Verkehrs auf andere Strecken lassen sich statisch gesehen zwei Möglichkeiten darstellen. So kann sich der Verkehr so auf die Alternativen verteilen, dass sich die Verkehrsstärke (je Fahrspur) auf den etwa gleich langen Alternativen erhöht, jedoch den Maximalwert aus allen Alternativen und der Ursprungstrecke nicht überschreitet, da dadurch die mittlere Geschwindigkeit infolge der Verkehrsstärkeerhöhung nicht unter den geringsten Wert

fallen kann. Dieser Wert wiederum ist durch seine Wirkung im *Status quo ante* etabliert und damit gültig. Voraussetzung hierfür ist lediglich, dass der zusätzliche Verkehr infolge der Einschränkung auf den Alternativen aufnehmbar ist und das lokale Maximum im *Status quo ante* nicht übersteigt.

Die zweite Möglichkeit, die sich demselben Umstand bedient, wäre eine Verteilung bis zu einem definierten maximalen Wert. Dieser wäre eine Folge der Auslastung des Gesamtnetzes und entspricht dann dem höchsten globalen Wert, der bei funktionsfähigem Verkehr gemessen wurde. Auch dieser würde durch den Sachverhalt legitimiert, dass er in der Praxis auftritt.

In beiden Fällen müssen die Alternativen ungefähr gleichwertig sein, damit die Auswirkungen auf die Fahrzeit den Verkehrsteilnehmer nicht beeinflussen. Wäre eine Alternative bspw. doppelt so lang wie eine andere, würde der Verkehrsteilnehmer auf der kürzeren Alternative eine Geschwindigkeit in Kauf nehmen, die der Hälfte der Geschwindigkeit auf der längeren Alternative entspricht.

Analog zum lokalen bzw. globalen Wert kann natürlich auch ein theoretischer Maximalwert angesetzt werden, der aus der Verkehrsplanung hervorgeht. Diesem Wert würden jedoch die gleichen Eigenschaften anhaften wie allen verkehrsplanerischen Elementen, da er nicht praktisch abgeleitet, sondern theoretisch hergeleitet ist.

Die statische Betrachtung ist dann von Vorteil, wenn ein expliziter Fall, bzw. ein explizites Ausfallereignis untersucht werden soll. Dieses Szenario muss hinsichtlich des Verkehrs vollkommen abbildbar sein, insbesondere was Mengen und Geschwindigkeiten angeht. Sind die Daten nicht bekannt, kann auf eine dynamische Bewertung zurückgegriffen werden.

6.1.1.2 Dynamische Bewertung

Soll die Wechselwirkung der Verkehrsteilnehmer untereinander und hinsichtlich der Strecken berücksichtigt werden, so ist eine dynamische Betrachtung notwendig. Diese berücksichtigt dabei Strecke und Alternativen entsprechend ihrer Abmessungen. Dabei setzt sie voraus, dass Verkehrsteilnehmer ihr Ziel schnellstmöglich erreichen wollen. Sie sind bereit, längere Strecken zurückzulegen, wenn die benötigte Zeit aufgrund höherer Geschwindigkeit kleiner ist als die der kürzeren Alternativen. Dabei benötigt die Bewertung eine Geschwindigkeit, mit der die Fahrzeuge unter den gegebenen Bedingungen die Strecke befahren. Diese Betrachtungsweise erfordert insbesondere die Berücksichtigung einer sich reduzierenden Geschwindigkeit in Abhängigkeit von einer Zunahme an Verkehrsteilnehmern.

Die dynamische Betrachtung erfolgt in der Regel durch eine Simulation. In der Forschung und am Markt sind viele kommerzielle Simulationsprogramme erhältlich, die versuchen, den Verkehr auf makroskopische Art und Weise abzubilden.

Ein Gewinn innerhalb der dynamischen Betrachtung liegt dann vor, wenn die Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer nicht von außen bestimmt werden kann. Das ist in der Regel dann der Fall, wenn aufgrund der Wechselwirkung der Verkehrsteilnehmer eine Behinderung untereinander vorliegt. Im Allgemeinen zeigt sich das in einer zu hohen Verkehrsstärke. Bereits unbeeinflusste Systeme können, zumindest zeitweise, instabile Verkehrsflüsse wie stockenden Verkehr oder Stau aufweisen.

Wenn eine allgemeine Menge an Ausfallereignissen untersucht wird und kein spezielles Ausfallereignis Gegenstand der Untersuchung ist, dann kann die dynamische Bewertung gegenüber der statischen im Vorteil sein. Vor allem dann, wenn eine Umlage des Verkehrs auf andere Routen nicht vollständig möglich ist.

6.1.2 Nutzenkomponenten und deren Erfassung/Beschreibung

Entsprechend der Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen für Straßen (EWS) lassen sich verschiedene Nutzenkomponenten bewerten. Jede Nutzenkomponente wird dabei mit mindestens einer Einheit vergleichbar gemacht. Im Folgenden sollen diese Einheiten abgeleitet und bewertet werden.

Betriebskosten werden in *Betriebskostengrundwerte* und *Kraftstoffkosten* unterteilt. Betriebskostengrundwerte sind abhängig von der Fahrzeuggruppe sowie der Länge, die sie befahren, was demzufolge ihrer Abbildungseinheit entspricht. Kraftstoffkosten werden pro Volumen berücksichtigt. Dabei ist eine gängige Kenngröße der Verbrauch in Volumen pro Länge. Dieser kann als Charakteristikum einer individuellen Fahrzeuggruppe verstanden werden, wodurch auch hier die letztendlichen Kenngrößen die Fahrzeuggruppe und die Länge darstellen.

Eine weitere Nutzenkomponente stellen die *Zeitkosten* dar. Sie berechnen sich auf Basis der Zeit. Zeitkosten werden nach Fahrzeuggruppe unterschieden und beziehen sich auf die Verweildauer innerhalb des Streckenabschnitts. Demzufolge können als Parameter die Fahrzeuggruppe, die Länge sowie die Geschwindigkeit festgelegt werden.

Die Nutzenkomponente *Unfallkosten* bezieht sich neben der Lage der Strecke (innerorts/außerorts) auf die Länge der Strecke, woraus sich die Bezugseinheit ergibt. Die Nutzenkomponenten *Schadstoffemissionen* und *Klimabelastung* werden in Massen von (Referenz-) Schadstoffen dargestellt, die sich aus den betrachteten Fahrzeugen sowie Länge und Dauer der Fahrt ergeben. So sind auch hier als Bezugseinheiten Fahrzeuggruppe, die Länge sowie die Geschwindigkeit anzusetzen. Alternativ können sie auch unter Berücksichtigung der Fahrzeuggruppe aus den Kraftstoffverbräuchen abgeleitet werden. Die *Lärmkosten* als Nutzenkomponente werden mittels Lärm-Einwohnergleichwerten bestimmt. Diese sind von externen Faktoren abhängig, da sie sich auf betroffene Einwohner, die keine direkten Teilnehmer am Verkehr sind, beziehen.

In der folgenden Abbildung sind die Nutzenkomponenten und Einheiten zusammengefasst dargestellt.

Nutzenkomponenten	ggf. Unterscheidungsebene	Bezugseinheiten
Betriebskosten	Betriebskostengrundwerte	Fahrzeuggruppe
		Länge
	Kraftstoffkosten je Kraftstoff	Fahrzeuggruppe
		Länge
Zeitkosten		Fahrzeuggruppe
		Länge
		Geschwindigkeit
Unfallkosten je Lage		Länge
Kosten der Schadstoffbelastung	CO, CH, Stickoxide(NO _x), Partikel	Fahrzeuggruppe
		Länge
Kosten der CO ₂ -Emissionen		Fahrzeuggruppe
		Länge

Tabelle 6-1: Darstellung der Nutzenkomponenten samt Bezugseinheiten in Konformität zur EWS

Die Reduktion auf drei Bezugseinheiten lässt sich vor allem durch die Möglichkeit herleiten, dass Mengen und Massen als charakteristische Größen der Fahrzeuggruppe einerseits sowie der Fahrcharakteristik andererseits ausgedrückt werden können. Zudem lässt sich die Trivialbeziehung zwischen Länge und Zeit verwenden, da die Geschwindigkeit die Ableitung der Länge (des Weges) nach der Zeit ist. Mithilfe der drei Bezugseinheiten für Nutzenkomponenten (Fahrzeuggruppe, Länge, Geschwindigkeit) lassen sich zwei Funktionen ableiten, welche die akkumulierte Zeit sowie die akkumulierte Länge der Fahrzeuggruppe abbilden.

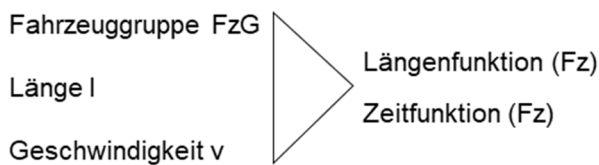


Abbildung 6-2: Überführung der Einheiten in die Funktionen der Fahrzeuggruppen

Die Längenfunktion ergibt sich zu

$$Länge (FzG) = Q_{FzG} * l$$

Formel 6-2: Berechnung der kumulierten Länge einer Fahrzeuggruppe

Und die Zeitfunktion ergibt sich zu

$$Zeit (FzG) = Q_{FzG} * l * v_{FzG}^{-1} = Länge(FzG) * v_{FzG}^{-1}$$

Formel 6-3: Berechnung der kumulierten Zeit einer Fahrzeuggruppe

Dabei sind beide Funktionen offensichtlich mit den Nutzenfunktionen vereinbar.

Neben den auf die drei Parameter abbildbaren Kostengruppen existieren Einflüsse innerhalb und außerhalb der Kostengruppen. Die innerhalb vorhandenen Einflüsse werden bereits durch die Kostenkennwerte berücksichtigt. Externe Effekte, die einen Verbrauch oder Ausstoß beeinflussen, dagegen nicht.

Zu diesen gehören unter anderem die Emissionen oder auch Kraftstoffverbräuche. Modernere Motoren sollten im Allgemeinen weniger Schadstoffe emittieren als ältere, insbesondere beim Verwenden von Dieselmotoren. Auch die Effizienz im Verbrauch unterscheidet sich. Dazu ändert sich der Verbrauch auch in Abhängigkeit von der Masse, die ein Resultat der Beladung darstellt. Einige dieser Externalitäten lassen sich berücksichtigen, so gibt es Daten über die Anteile an Fahrzeugen der verschiedenen Kraftstoffe und Abgasnormen. Werte wie bspw. Verbräuche in Abhängigkeit von der Motordrehzahl können dagegen nicht berücksichtigt werden, und werden als Mittel geringfügigen Einflusses den internen Einflüssen zugeordnet.

6.1.3 Analyse der logischen Beschaffenheit der Nutzenkomponenten

6.1.3.1 Abhängigkeiten der Komponenten in Bezug auf die Geometrie

Betrachtet man die Berechnungsvorschriften der EWS 97 hinsichtlich der monetären Bewertung der Straßen, so lassen sich verschiedene Abhängigkeiten identifizieren. Die *Zeitkosten*, die größte Position der Nutzengruppen, ist abhängig von der Zeit. Dementsprechend liegt ein linearer Zusammenhang zur Länge vor. Steigt die Länge gegenüber der Ursprungsbetrachtung, so steigen auch die Zeitkosten. Umgekehrt proportional verhält es sich zur Geschwindigkeit. Bewegen sich die Betrachtungseinheiten schneller, so benötigen sie weniger Zeit. Die Zeitkosten sinken dann. Auch die Betriebskosten weisen Abhängigkeiten auf. Die *Grundwerte* sind direkt von der Länge abhängig, es herrscht dementsprechend eine lineare Abhängigkeit. Die *Kraftstoffkosten* dagegen sind sowohl von der Länge als auch von der Geschwindigkeit abhängig, da ein Motor bei höheren Geschwindigkeiten mehr Kraftstoff verbraucht. Steigen diese Werte, so steigen auch die Kraftstoffkosten. Analog verhält es sich zu den CO₂-Kosten. Die Menge an CO₂ ist vom Verbrauch an Kraftstoff abhängig, demzufolge von Länge und Geschwindigkeit. Zudem ist das Verhältnis zwischen Kraftstoffkosten und CO₂-Kosten theoretisch eindeutig, in der Praxis beträgt die Abweichung weniger als 1 %. Die *Unfallkosten* sind über einen betrachteten Querschnitt direkt abhängig von der Länge desselben. Sie entsprechen von ihrer Art den Grundwerten der Betriebskosten. Unterschiede sind in den Kosten für Schadstoffe festzustellen. Bis auf Ausnahmen sind sie im Allgemeinen sowohl von der Länge als auch von der Geschwindigkeit abhängig. Die *Schadstoffkosten der Partikel* sind im Bereich der PM₁₀ von der Geschwindigkeit unabhängig. Lediglich die Länge wirkt sich auf sie aus, da sie im Wesentlichen durch Abrieb erzeugt werden. Im Bereich der *gasförmigen Schadstoffe* verhalten sich die flüchtigen organischen Verbindungen

ohne Methan (NMVOC) antiproportional zur Geschwindigkeit, die Belastung und die Kosten sinken demzufolge bei steigender Geschwindigkeit.

6.1.3.2 Abhängigkeiten der Komponenten infolge von Veränderungen

Kommt es auf einem betrachteten Streckenabschnitt zu einer Einschränkung, so verändern sich die Längen oder Geschwindigkeiten, die ein einzelnes Fahrzeug durchfährt. Berücksichtigt man die Zusammenhänge vor dem Hintergrund der Geometrie, kann man sowohl die Länge als auch die Geschwindigkeit nach dem trivialen Zusammenhang zwischen Zeit, Länge und Geschwindigkeit mithilfe der Zeit abbilden.

Die Folgen einer Einschränkung lassen sich mit den beiden Betrachtungen der Änderung hinsichtlich Zeit und Länge jederzeit abbilden. Eine Umleitung auf Strecken der gleichen hierarchischen Ebene wird bspw. die Geschwindigkeit nicht beeinflussen, jedoch die Länge. Eine Umleitung auf eine untergeordnete Strecke ändert in der Regel die Geschwindigkeit und gleichzeitig, wenn auch nicht zwingend, die Länge. Ist die Umleitung nicht in der Lage, den zusätzlichen Verkehr uneingeschränkt aufzunehmen, so ändert sich wieder die Geschwindigkeit.

Es wird im Folgenden die Dauer betrachtet, die das Fahrzeug zum Durchfahren der Strecke von A nach B benötigt.

Im Falle einer Umleitung ändert sich nun die Länge, die das Fahrzeug zurücklegen muss, bei einer gegebenen Geschwindigkeit. Diese Längenänderung wirkt sich auf die Kosten, die es verursacht, aus. Die folgende Abbildung zeigt, dass der Zusammenhang dabei strikt linear ist. Legt das Fahrzeug die doppelte Strecke zurück, so entsteht bei unveränderter Geschwindigkeit die doppelte benötigte Zeit. Diese erzeugt wiederum genau doppelt so hohe Kosten.

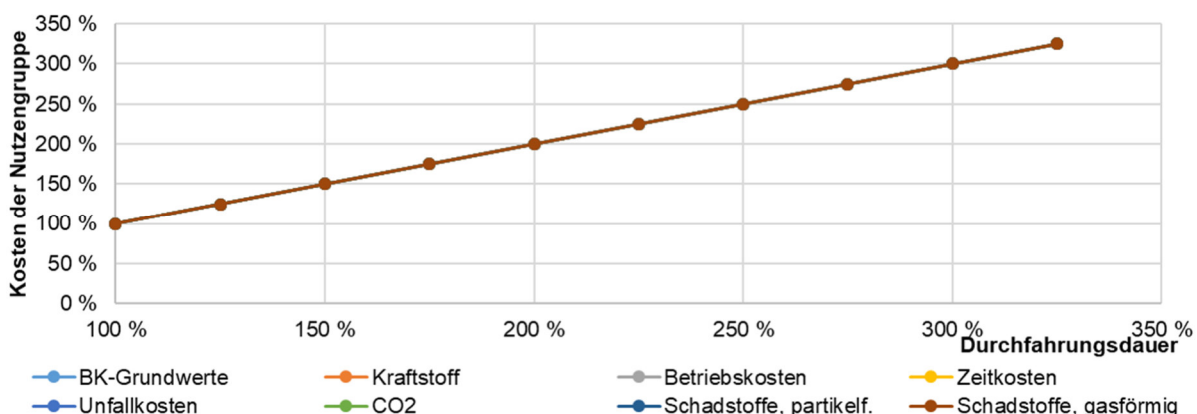


Abbildung 6-3: Änderung der Kosten infolge der Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrungsdauer

Die Geraden in der Abbildung sind dabei deckungsgleich und liegen übereinander. Der Zusammenhang liegt darin begründet, dass alle betrachteten Nutzenkomponenten mindestens in

der Länge von der Strecke abhängig sind. Darüber hinaus sind sie exakt gleich abhängig und zwar in linearer Weise, die Steigung jeder Geraden beträgt in jedem Punkt 1.

Analog zur Änderung der Länge einer Strecke kann die Veränderung der Geschwindigkeit betrachtet werden. Verringert sich diese infolge einer Einschränkung, bedeutet dies eine positive Veränderung der Durchfahrtsdauer. Die folgende Abbildung zeigt die Veränderung.

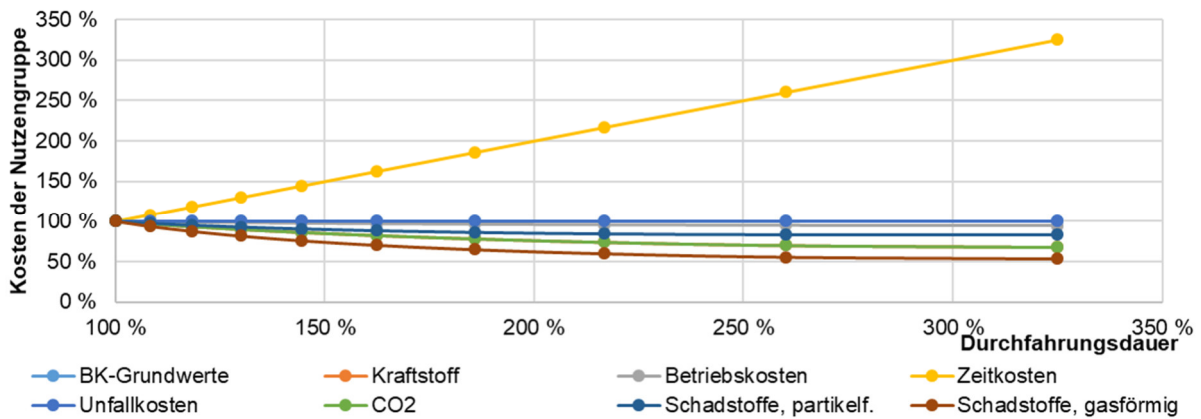


Abbildung 6-4: Änderung der Kosten infolge der Geschwindigkeitsbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrtsdauer

Für die Zeitkosten ist ein linearer Anstieg der Kosten zu erkennen, da die Durchfahrtsdauer umgekehrt proportional strikt linear zur Geschwindigkeit ist. Die anderen Kosten verhalten sich proportional zur Geschwindigkeit und sinken mit sinkender Geschwindigkeit. Zudem sinkt der Betrag der Änderung mit zunehmender Änderung der Durchfahrtsdauer.

Die beiden Änderungen der Länge und der Geschwindigkeit lassen sich auch überlagern. Durch die lineare Verknüpfung entsteht eine Addition der beiden Fälle, die sich auf die Durchfahrtsdauer in doppelter Weise auswirkt.

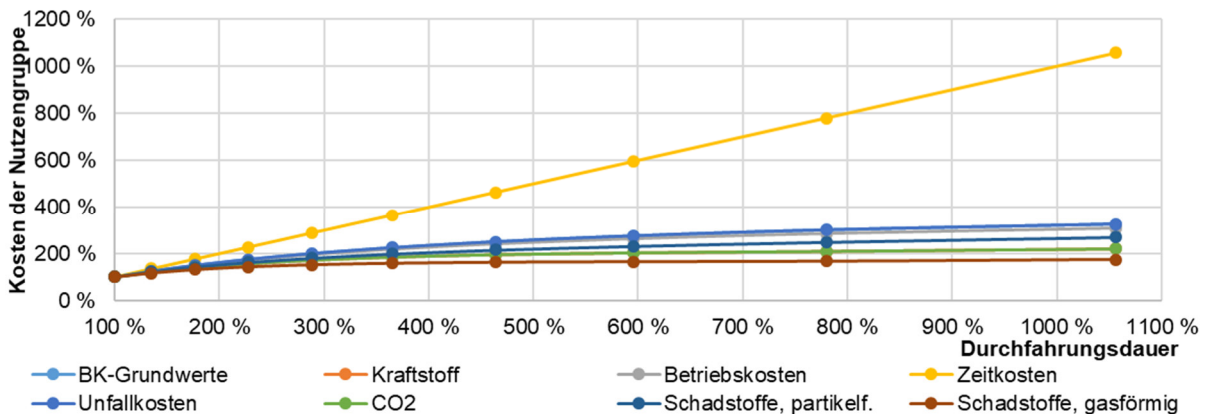


Abbildung 6-5: Änderung der Kosten infolge gleichzeitiger Geschwindigkeits- und Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrtsdauer

Die Zeitkosten steigen dabei in doppelter Weise, da die Änderungen beider Fälle zur Erhöhung der Durchfahrtszeit führen und sich nun überlagern. Die übrigen Nutzengruppen überlagern sich in einer steigenden und einer sinkenden Funktion, wobei die steigende jedoch über alle Gruppen und Änderungen dominant ist. Je größer die Steigung der Funktion einer Nutzengruppe ist, desto stärker fällt sie ins Gewicht. Umgekehrt bedeutet dies, dass bei einer geringeren Steigung die Nutzengruppe robuster gegenüber Einschränkungen ist.

Diese Dominanz ist jedoch auch ein Ergebnis der überlagerten Änderungen, da diese auf eine gleiche Durchfahrtsdauer bezogen sind. Diese verlängert sich dann analog in einer überlagerten Art und Weise. Aus diesem Grund kann man nicht pauschal von steigenden Kosten infolge einer Einschränkung an Geschwindigkeit oder Länge ausgehen. Eine (mutwillige) Skalierung der Überlagerung, dass die Änderung (exklusive Zeitkosten) erst zu-, dann wieder abnimmt.

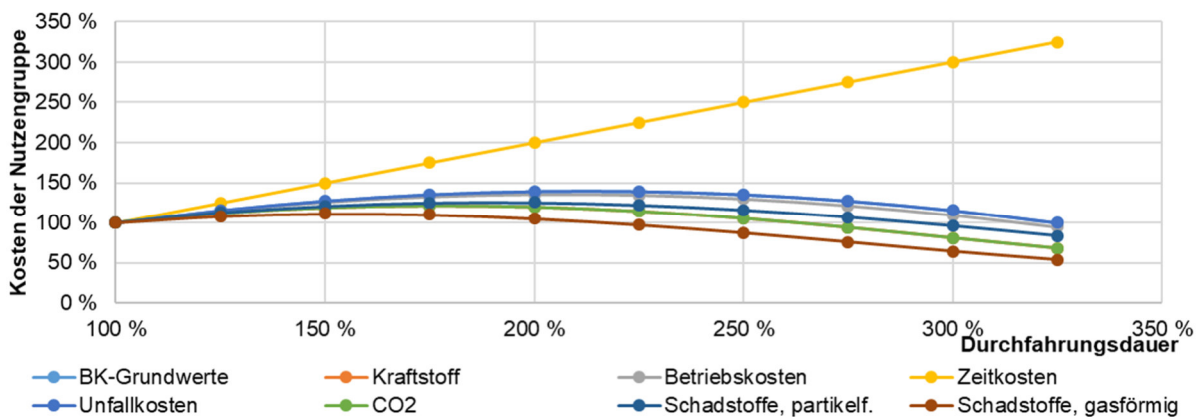


Abbildung 6-6: Skalierte Änderung der Kosten infolge gleichzeitiger Geschwindigkeits- und Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrtdauer

Eine quantitative Aussage ist in diesem Fall zwar nicht möglich, es zeigen sich aber die unterschiedlichen Fälle, die sich bei Betrachtung expliziter Szenarien ergeben können.

Anhand der Betrachtung kann man die herausstechende Rolle der Zeitkosten erkennen. Diese wirkt sich bezogen auf eine Einschränkung sehr deutlich aus. Betrachtet man einen Untersuchungsfall mit Einschränkung gegenüber dem uneingeschränkten Untersuchungsfall, werden die Zeitkosten einen deutlichen Bedeutungsgewinn erfahren. Das wird im späteren Verlauf auch innerhalb der Untersuchungen deutlich.

Über die angenommenen Einschränkungen und die daraus resultierenden Verläufe der Kosten der Nutzenkomponenten sind auch allgemeingültige Regressionen ableitbar. Das ermöglicht eine Berechnung der Kosten auf Basis der Änderung von Zeit, ohne die klassische Nutzenberechnung aus den EWS oder Ähnlichem für jeden Fall explizit und vollständig durchführen zu müssen, sondern direkt mithilfe der Änderung durchführen zu können.

6.1.4 Bestimmung der Ausfallbedeutung der Verkehrsinfrastruktur und deren Objekte

Im ersten Schritt wird der zu betrachtende Streckenabschnitt definiert, in dem das zu untersuchende (auszufallende) Objekt liegt. Dieser wird vor dem Hintergrund der potentiellen (oder realen) Einschränkung gewählt. Ähnlich der Graphentheorie wird der Streckenabschnitt als Kante zwischen zwei Knoten gewählt. Das bedeutet, dass bei einer punktuellen Einschränkung (bspw. an einer Brücke) ebenso wie bei einer längenbezogenen Einschränkung (bspw. eine baustelleninduzierte Fahrbahnverengung) eine längere Strecke gewählt wird. Dabei sollte sie so gewählt werden, dass sie zwischen zwei Punkten liegt, an denen die Fahrzeuge in alternative Abschnitte einfahren können. Die folgende Abbildung zeigt das allgemeine Vorgehen, das im Folgenden genauer erläutert wird.

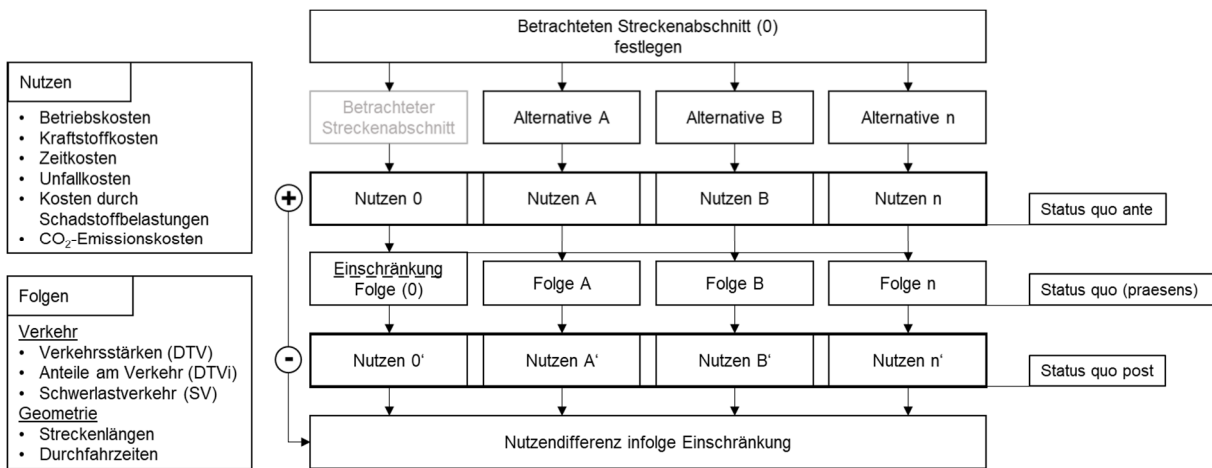


Abbildung 6-7: Vorgehen zur Bewertung einer Nutzendifferenz infolge einer bestimmten Einschränkung

Die Alternativen werden im nächsten Schritt gewählt. Sie sind dabei optional und entfallen, wenn der gesamte Verkehr durch die Einschränkung geführt wird. Alternativen sind so beschaffen, dass sie am Anfang sowie am Ende ihrer Führung die Ausgangsstrecke schneiden. Dadurch können sie, zusammen mit der Ausgangsstrecke, einen Graphen bilden.

Die Strecken werden als Reihe der realen Datenmesspunkte abgebildet. Dazu werden die individuellen Nummern der Zählstellen in entsprechender Reihenfolge notiert. Zudem werden die globalen Parameter der Strecke, wie Länge und Geschwindigkeit der Fahrzeugklassen aufgenommen. Dies geschieht sowohl für den uneingeschränkten als auch für den eingeschränkten Fall. Die lokalen Parameter der Datenmesspunkte werden den entsprechenden Strecken im uneingeschränkten Fall zugeordnet.

Anschließend werden die Fahrzeuge der einzelnen Klasse jeder Strecke berücksichtigt. Dazu werden die entsprechenden Verkehrsstärken verwendet. Dies geschieht zuerst für den uneingeschränkten Fall. Auf Basis der Daten dieses Falles werden die maximal aufnehmbaren Mengen bestimmt. Dabei findet auch die Anzahl der Fahrstreifen, gegeben durch den Querschnitt,

Berücksichtigung. Hintergrund dieser Ermittlung ist die Verteilung der zusätzlichen Fahrzeuge, die aufgrund der Einschränkung der Ursprungsstrecke entstehen. Diese werden so verteilt, dass die Belastung der einzelnen Fahrstreifen der Alternativen gleichmäßig erfolgt.

Hintergrund: Unterschiedliche Alternativen können unterschiedliche Längen aufweisen. Der rationale Verkehrsteilnehmer wird in erster Instanz die kürzeste Alternative wählen, da diese bei gleicher Geschwindigkeit zugleich die schnellste darstellt. Diese Alternative wird sodann dominant, da sie für den Großteil der Teilnehmer die kürzeste und schnellste Alternative darstellt. Durch das erhöhte Aufkommen kann es nun passieren, dass das Potential der Strecke ausgeschöpft wird und die Verkehrsstärke zu groß wird. Die Folge ist eine Verminderung der tatsächlichen Geschwindigkeit. Dadurch gewinnt die längere Alternative an Wert, da hier die Geschwindigkeit, relativ betrachtet, eine höhere ist. Letzten Endes wird die Auslastung sich so einpendeln, dass die erwartete Durchfahrtdauer der Alternativen gleich ist, wenn die Zeit als dominanter Grund der Entscheidung gewählt wird.

Auf Basis der Berechnungen, bezogen auf die Auslastung der einzelnen Fahrstreifen, wird anschließend die Verteilung der Fahrzeuge entsprechend ihrer Klassen vorgenommen. Entsprechend der Nullsummencharakteristik ist die kumulierte Menge der Fahrzeuge vor der Einschränkung gleich der kumulierten Menge der Fahrzeuge nach Eintreten der Einschränkung.

Aufbauend auf der Verteilung der Fahrzeuge auf die unterschiedlichen Strecken sowie deren Parametern können nun die beiden Informationen „zusätzliche Fahrzeit“ sowie „zusätzliche Wegstrecke“ berechnet werden. Diese werden sowohl pro Strecke (zum Soll-Ist- bzw. Vorher-Nachher-Vergleich) als auch global (zur Gesamtnutzenberechnung) ermittelt. Mithilfe der beiden Kennwerte sind bereits erste qualitative Aussagen hinsichtlich der Einschränkung möglich.

Aufgrund der trivialen Beziehung zwischen Länge, Zeit und Geschwindigkeit lassen sich alle drei Einheiten bei den weiteren Berechnungen verwenden, da immer mindestens zwei vorhanden sind.

Für die Betriebskosten stellt die einschlägige Literatur Kosten für den Grundwert in Abhängigkeit von den Elementen der Fahrzeuggruppe und pro 100 km zur Verfügung. Mithilfe der Kostenkennwerte ermitteln sich die Betriebskosten-Grundwerte zu:

$$\Delta \text{Betriebskostengrundwert (BKG)} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta s_i}{100 \text{ km}} * KK_{BKG,i} * Q_i$$

Formel 6-4: Formel zur Berechnung des Betriebskostengrundwertes

Dabei werden die Betriebskostengrundwerte je Fahrzeuggruppe gebildet und anschließend addiert.

Ferner sind die Kraftstoffkosten den Betriebskosten zuzuordnen. Mittels der für Nutzen-Kosten-Analysen in Bayern etablierten Verbrauchs- und Emissionsfunktionen lassen sich die Emissionsfaktoren entsprechend der Parameter nach der HBEFA 2.1 bestimmen zu:

$$e(V) = e_1 + e_2 * e^{-\frac{V-V_0}{V_1}} + e_3(V - V_0)^n + e_4 * e^{-\frac{(V-V_2)^2}{V_3^2}} \quad \text{für } V > V_0$$

Formel 6-5: Funktionaler Zusammenhang zwischen mittlerer Fahrzeug-Geschwindigkeit und Kraftstoffverbrauch bzw. Schadstoffemission³⁴⁶

Für den Kraftstoffverbrauch bedeutet dies, da jener üblicherweise in Volumen gemessen wird und sich Kostenkennwerte auf Liter beziehen, dass die Formel zur Umrechnung durch die mittlere Dichte des Kraftstoffs (bei 8°C^{347 348}) dividiert werden muss. Zudem ist zwischen Otto- und Dieseldieselkraftstoff zu unterscheiden. Diese Unterscheidung wird nur im Bereich der Pkw angestellt, einen Anhaltspunkt zur Verteilung liefert das Kraftfahrtbundesamt. Somit ergeben sich die Kraftstoffkosten letztlich zu:

$$\begin{aligned} \Delta \text{Kraftstoffkosten (KS)} \\ = \sum_{i=1}^n e(V)_i * \Delta s_i * Q_i * \rho_D^{-1} * KK_{KS,D} * A_D + \sum_{i=1}^n e(V)_i * \Delta s_i * Q_i * \rho_O^{-1} * KK_{KS,O} * A_O \end{aligned}$$

Formel 6-6: Formel zur Berechnung des Kraftstoffverbrauchs

Anschließend erhält man die Betriebskosten durch Addition der Kraftstoffkosten sowie der Betriebskostengrundwerte:

$$\Delta \text{Betriebskosten (BK)} = \Delta \text{Betriebskostengrundwert (BKG)} + \Delta \text{Kraftstoffkosten (KS)}$$

Formel 6-7: Berechnung der Betriebskosten

Die Zeitkostenermittlung verhält sich analog zur Berechnung der Betriebskostengrundwerte. Die bereits ermittelten zusätzlichen Stunden Fahrleistung werden mit entsprechenden Kostenkennwerten in Abhängigkeit von den Elementen und der Fahrzeugklasse multipliziert und anschließend addiert:

$$\Delta \text{Zeitkosten (ZK)} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i * KK_{ZK,i} * Q_i$$

Formel 6-8: Formel zur Berechnung der Zeitkosten

³⁴⁶ Vgl. Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR; AVISO GmbH: *Bewertungsverfahren zur Aufstellung des 7. Ausbauplans für die Staatsstraßen in Bayern: Teil: Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)* (Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium, 09.2011), S. 74.

³⁴⁷ Vgl. für Ottokraftstoffe: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Kraftstoffe – Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017).

³⁴⁸ Vgl. für Dieseldieselkraftstoffe: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Kraftstoffe – Dieseldieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren* (Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017).

Die Berechnung der Schadstoffe erfolgt überwiegend nach Formel 6-5. Mit ihr lassen sich die Belastungen durch Kohlenstoffdioxid (CO₂), Stickoxide (NO_x), Schwefeldioxid (SO₂) und flüchtige organische Verbindungen (NMVOC) sowie Feinstaub (PM_{2,5}) ermitteln. Für Partikel aus Abrieb und Aufwirbelung (PM₁₀) kann mittels vereinfachter Berechnung der entsprechende Wert berechnet werden. Die Angaben beziehen sich jeweils auf einen gefahrenen Kilometer eines Elementes der Fahrzeugklasse. Für die Kosten infolge der Schadstoffbelastung ergibt sich:

$$\Delta\text{Schadstoffkosten i. Abh. v. d. Schadstoffklasse (SSK}_{SK}) = \sum_{i=1}^n e(V)_i * \Delta s_i * Q_i * KK_{SK}$$

Formel 6-9: Formel zur Berechnung der Schadstoffkosten in Abhängigkeit von der Schadstoffklasse

Bei gleichzeitiger Summation über die unterschiedlichen Schadstoffklassen erweitert sich die Formel zu:

$$\Delta\text{Schadstoffkosten (SSK)} = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n e(V)_i * \Delta s_i * Q_i * KK_j$$

Formel 6-10: Formel zur Berechnung der Schadstoffkosten

Für die Berechnung der Unfallkosten werden die zusätzlich gefahrenen Kilometer mit Kostenkennwerten multipliziert. Da die Kostenkennwerte Jahreswerte darstellen, ist hier eine Division mit der Menge der Zeiteinheiten eines Jahres notwendig. Die Kostenkennwerte müssen für jeden Querschnitt getrennt ausgeführt werden, da jeder Querschnitt eine andere Unfallkostenrate besitzt.

Die Unfallkosten ergeben sich je Zeiteinheit (hier 24h) zu:

$$\Delta\text{Unfallkosten (UK)} = 1000 * \sum_{i=1}^n 365 * 10^{-6} * UKR_i * Q_i * \Delta s_i * 365^{-1}$$

Formel 6-11: Formel zur Berechnung der Unfallkosten^{349 350}

Die Ermittlung der Lärmkosten erfolgt durch die Berechnung der Lärmeinwohnergleichwerte. Dabei werden die Einwohner innerhalb der ersten fünf Bebauungsreihen an einer Straße berücksichtigt. Es werden jeweils das Maß der Überschreitung der Grenzwerte multipliziert mit der Menge der Einwohner berücksichtigt. Da die Kostenkennwerte Jahreswerte darstellen, ist hier eine Division mit der Menge der Zeiteinheiten eines Jahres notwendig. Befinden sich an den untersuchten

³⁴⁹ Vgl. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997).

³⁵⁰ Vgl. Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR; AVISO GmbH: *Bewertungsverfahren zur Aufstellung des 7. Ausbauplans für die Staatsstraßen in Bayern: Teil: Nutzen-Kosten-Analyse (NKA)* (Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium, 09.2011).

Strecken keine Anwohner, so entfallen die Lärmkosten. Die Variable E stellt die Anzahl der Einwohner pro Längeneinheit dar.

$$\Delta \text{Lärmkosten (LK)} = \sum_{i=1}^n E_i * LEG_i * \Delta S_i * 365^{-1} * KK_{LK}$$

Formel 6-12: Formel zur Berechnung der Lärmkosten³⁵¹

Zum Abschluss werden alle ermittelten Kosten addiert und somit ein Kostenkennwert bezogen auf die gewählte Zeiteinheit (z.B. 24h) erzeugt.

$$\begin{aligned} \text{wirtschaftlicher Schaden (ZE)} &= \\ & \sum_{i=1}^n \Delta \text{Kosten}_i = \\ & \text{Betriebskosten} + \text{Zeitkosten} + \text{Schadstoffkosten} + \text{Unfallkosten} + \text{Lärmkosten} = \\ & (BKG + KS) + ZK + SSK + UK + LK \end{aligned}$$

Formel 6-13: Formel zur Berechnung des wirtschaftlichen Schadens je Zeiteinheit

Anschließend muss dieser Wert noch mit der Dauer der Einschränkung bzw. der Betrachtung multipliziert werden.

$$\text{wirtschaftlicher Schaden} = ZE * \sum_{i=1}^n \Delta \text{Kosten}_i$$

Formel 6-14: Formel zur Berechnung des wirtschaftlichen Schadens

6.1.5 Änderung der Leistungsfähigkeit infolge einer Einschränkung

6.1.5.1 Uneingeschränkter Fall (Status quo ante)

Betrachtet man den Verkehr eines Streckenabschnittes, so lässt sich der erbrachte Nutzen in Abhängigkeit von den Nutzengruppen bestimmen. Möchte man die Nutzenkomponenten untereinander vergleichen, so empfiehlt sich eine prozentuale Aufteilung. Die folgende Tabelle stellt Streckenabschnitte einer sechsspurigen Autobahn dar, mit einer durchschnittlichen Belastung:

<i>BK-Grundwerte</i>	80 %
<i>Kraftstoff</i>	20 %
Betriebskosten	55 %
Zeitkosten	34 %
Unfallkosten	5 %

³⁵¹ In Anlehnung an: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen* (Köln: FGSV, 1997), S. 38.

CO ₂	4 %
Schadstoffe, Partikel	0,8 %
Schadstoffe, gasförmig	0,5 %
Lärmkosten	0 %
	100 %

Tabelle 6-2: Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten ohne Einschränkung

Die Betriebs- und Zeitkosten machen dabei etwa 90 % der Kosten des Nutzens. Der Rest entfällt auf Kosten für Unfälle und CO₂-Emissionen. Die übrigen Schadstoffe machen dagegen nur ungefähr 1 % aus. Die Betriebskosten selbst sind vom Längen-Geschwindigkeits-Verhältnis abhängig und weisen auf Grundwerte und Kraftstoffe ein Verhältnis von 4:1 in den Kosten auf.

6.1.5.2 Eingeschränkter Fall (Status quo post)

In expliziten Untersuchungsfällen kann sich die Verteilung ändern. Die unterschiedlichen Nutzenkomponenten weisen unterschiedliche Auswirkungen auf den Nutzen auf. Im Folgenden soll dies veranschaulicht werden:

Dazu soll ein Sachverhalt konstruiert werden, welcher der zeitweisen Sperrung der Rheinbrücke bei Leverkusen (Bundesautobahn 1) vom 30. November 2012 bis zum 03. März 2013 für den Schwerlastverkehr bei gleichzeitiger Reduzierung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für den Pkw-Verkehr auf 60 km/h entspricht. Es handelt sich dabei jedoch nicht um eine Beispielrechnung, da insbesondere die Kostenkennwerte nicht dem Zeitraum des Vorfalls entsprechen.

Der Schwerlastverkehr soll über zwei mögliche Nordumfahrungen bzw. eine südliche Umfahrung abgewickelt werden. Die Führung des Pkw-Verkehrs soll unverändert bleiben. Die Auslastungen der Umfahrungen bleiben spurbezogen unter dem lokalen Maximum der Südumfahrung, damit ist das Szenario plausibel und führt zu keiner Überlastung der alternativen Routen.

Die folgende Tabelle zeigt die Verteilung der Kosten der Nutzenkomponenten. Dabei beziehen sich die absoluten Werte jeweils auf eine Zeiteinheit. Die Lärmkosten wurden vernachlässigt, da der Verkehr in diesem Szenario ausschließlich über Bundesautobahnen abgewickelt wurde und eine Bebauung durch Wohngebäude in der entsprechenden Distanz unwahrscheinlich ist.

<i>BK-Grundwerte</i>	76 %
<i>Kraftstoff</i>	24 %
Zeitkosten	57 %
Betriebskosten	36 %
CO ₂ -Emissionskosten	3 %
Unfallkosten	2 %
Schadstoffe, Partikel	0,9 %
Schadstoffe, gasförmig	0,7 %

Lärmkosten	0 %
	100 %

Tabelle 6-3: Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten mit Einschränkung I

Betrachtet man die Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten, so lässt sich feststellen, dass diese qualitativ gesehen einer Pareto-Verteilung ähnlich sind bzw. dem Paretoprinzip entsprechen. Ihr Verhalten ist sogar noch stärker ausgeprägt. So zeigt sich, dass bei einem Vergleich eines Streckenabschnittes mit Streckenabschnitten gleicher Dimensionierung die Kosten der Komponenten für Betrieb und Zeit zusammen mehr als 90 % der gesamten monetären Bewertung ausmachen, in anderen Quellen der Literatur sogar mehr als 95 %.³⁵² Dies lässt sich daraus begründen, dass gleich dimensionierte Alternativen den Verkehr gleichartig zu ursprünglichen Strecke aufnehmen. Die maßgebende Änderung ist hier die Längendifferenz, ugs. der Umweg, während die Geschwindigkeit und die Fahrzeuge nahezu identisch sind. Erst bei einer Herabsetzung der Geschwindigkeit, wie hier für den Pkw-Verkehr auf der Ursprungsstrecke, entweder mutwilliger (Geschwindigkeitsbegrenzung) oder natürlicher Natur (zu hohe Verkehrsstärke), ändert sich dieses Phänomen. Durch die erhöhte Zeit für eine gleiche Strecke (und damit entsprechend verminderter Geschwindigkeit) erhöht sich die Verweildauer im Abschnitt, was zu einer Steigerung der Emissionen von Schadstoffen und Kohlenstoffdioxid führt, trotz teilweise gleichzeitig geringerer Drehzahlen der Motoren. (Unter genauerer Berücksichtigung von Motorisierung und Kostenkennwerten lassen sich die Kohlenstoffdioxid-Emissionskosten gegenüber den Schadstoffbelastungen als sehr geringfügig ausweisen). Die Verteilung der Gruppen wird im Folgenden graphisch dargestellt:

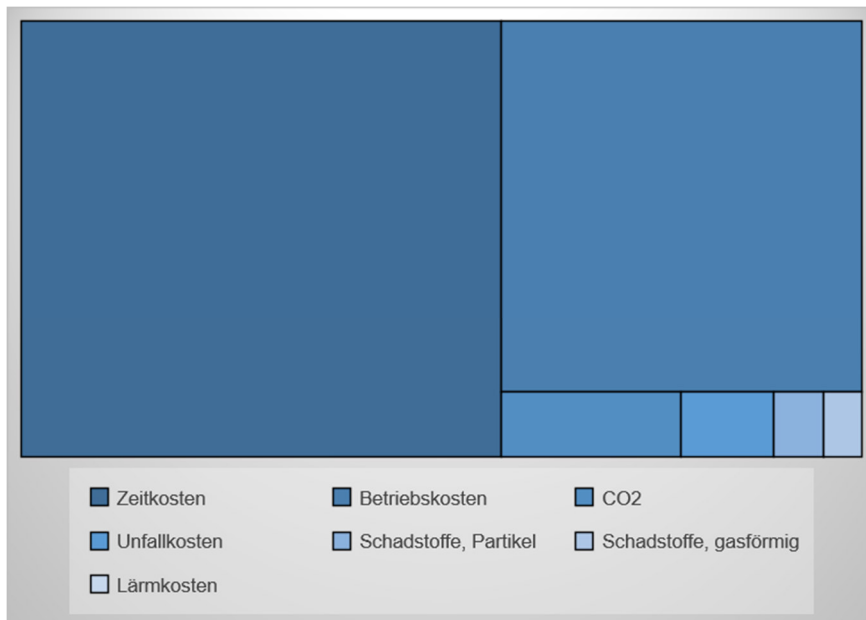


Abbildung 6-8: Graphische Verteilung der Anteile der Kosten an den Nutzengruppen

³⁵² Berechnet auf Basis von: Schulz, Wolfram H.; Mainka, Miriam: *Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Sperrung der A1-Rheinbrücke für den Lkw-Verkehr: Wissenschaftliche Studie im Auftrag von Pro Mobilität – Initiative für Verkehrsinfrastruktur e. V.* (23.07.2013), S. 18.

Durch die Einschränkung lässt sich eine Verteilung der Kosten aus Richtung der Betriebskosten in Richtung der Zeitkosten erkennen. Der Grund liegt im Wesen der Einschränkungen selbst, da sie den Verkehrsfluss hemmen und die Zeit, die der Verkehr benötigt, erhöht. Dabei werden sowohl Strecken länger als auch Geschwindigkeiten geringer. Die benötigte Zeit wächst dementsprechend in zweifacher Weise.

Betrachtet man zudem eine mögliche Änderung der Geschwindigkeit auf den Alternativen infolge des steigenden Verkehrs oder auch die Verlagerung auf untergeordnete Straßen, bspw. auf Bundesstraßen, so ändert sich der Zusammenhang zwischen den Nutzengruppen weiter.

<i>BK-Grundwerte</i>	76 %
<i>Kraftstoff</i>	22 %
Zeitkosten	77 %
Betriebskosten	19 %
CO ₂	2 %
Unfallkosten	1 %
Schadstoffe, Partikel	1 %
Schadstoffe, gasförmig	1 %
Lärmkosten	0 %
	100 %

Tabelle 6-4: Verteilung der monetär bewerteten Nutzenkomponenten mit Einschränkung II

Die Zeitkosten wachsen infolge der stärkeren Einschränkung verhältnismäßig noch weiter an. Zwar mögen absolut auch andere Kosten steigen, jedoch können sie sich nicht gegen das Ausmaß der Zeitkosten behaupten, die in der Wirtschaftlichkeit eine sehr hohe Bedeutung haben.

6.1.5.3 Beeinflussung der Bedeutung infolge einer Einschränkung

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus den vorherigen Abschnitten lassen sich für die Bedeutung der Streckenabschnitte hinsichtlich des Nutzens einige Punkte ableiten, die eine Beeinflussung stärker beschreiben als andere.

Eine Längenänderung infolge einer Umleitung erhöht die Kosten *ceteris paribus* in gleichem Maße, in dem die Längenänderung stattfindet. Das bedeutet qualitativ, dass diese allgemein „schlecht“ ist, eine gesonderte Betrachtung der einzelnen Nutzenkomponenten ist überflüssig, da sich die Summe verhältnismäßig nicht ändern würde. Die folgende Abbildung stellt den Zusammenhang dar:

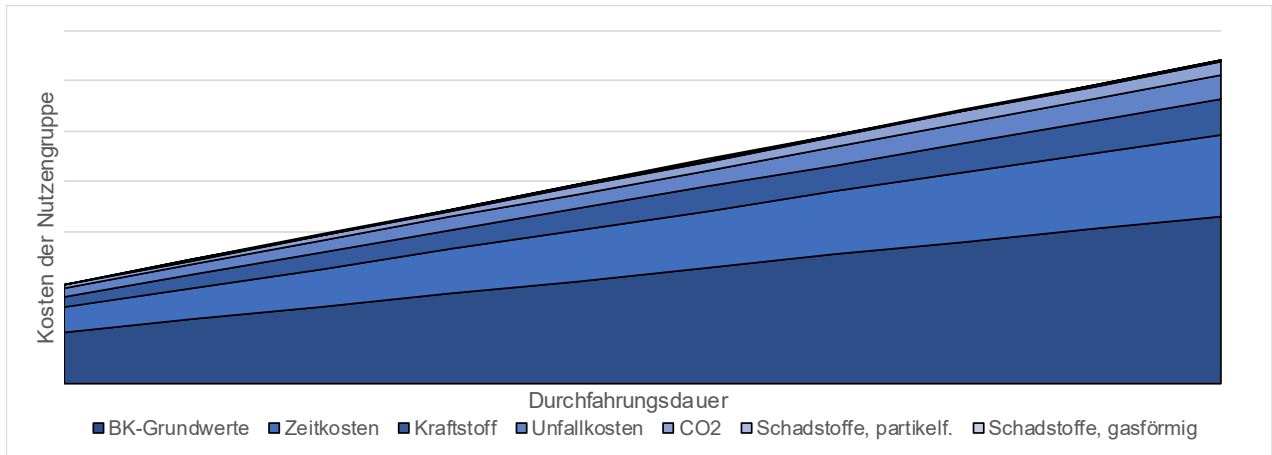


Abbildung 6-9: Gesamtbetrachtung der Änderung der Kosten infolge einer Längenbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrungsdauer

Die lineare Entwicklung der einzelnen Komponenten überlagert sich zu einer linearen Gesamtentwicklung. Aus der Abbildung geht zudem der Anteil der einzelnen Nutzenkomponenten hervor. Bei einer Längenänderung müssen die Grundwerte der Betriebskosten, die Zeitkosten, sowie die Kraftstoffkosten berücksichtigt werden, da diese bereits ca. 90 % der Kosten verursachen. Unter Hinzuziehen von Unfall- und CO₂-Kosten erhöht sich die Menge auf fast 99 %.

Diese Betrachtungsweise lässt sich analog auch für die Änderung der Geschwindigkeit anwenden.

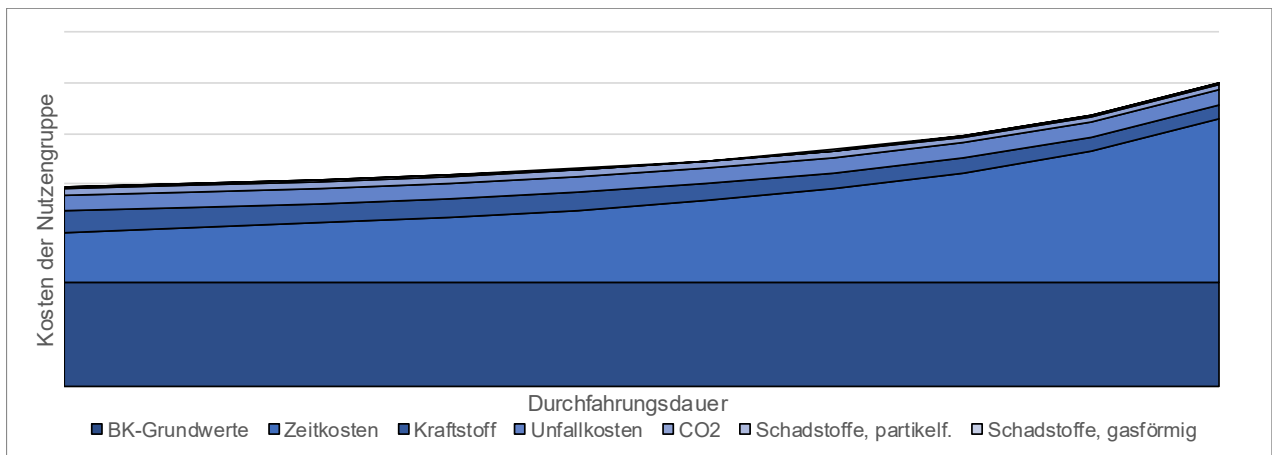


Abbildung 6-10: Gesamtbetrachtung der Änderung der Kosten infolge einer Geschwindigkeitsbeeinflussung bezogen auf die Durchfahrungsdauer

Hier erzeugen die Zeitkosten einen Anstieg der Kosten für den Verkehr, während die übrigen Nutzenkomponenten eine Reduktion erzeugen. Insgesamt erhöhen sich die Kosten jedoch in jedem Punkt, da die Zeitkosten die Summe der anderen Kosten in jedem Punkt überkompensieren. Die Bedeutung der Zeitkosten steigt dabei in der individuellen Betrachtung, in der Gesamtbetrachtung ist sie ohnehin sehr hoch. Somit müssen bei einer Geschwindigkeitsänderung die Grundwerte der Betriebskosten, die Zeitkosten sowie die Kraftstoffkosten berücksichtigt

werden, um ca. 93 % der Kosten zu berücksichtigen. Unter Hinzuziehen von Unfall- und CO₂-Kosten erhöht sich die Menge auf fast 99 %.

Die Kostentreiber der Nutzenbetrachtung sind somit in Form von Betriebs- und Zeitkosten identifiziert. Auch bei einer Änderung sind dies die Kostentreiber, wobei ihre Bedeutung noch zunimmt und sich insbesondere die Zeitkosten verstärken.

Die übrigen Nutzenkomponenten weisen dagegen zum einen geringere Kosten in Summe auf (< 10 %) und zum anderen eine geringere Änderung bei Änderung der verkehrlichen Gegebenheiten, sodass sich ihr Anteil auch nicht weiter verändert (und zudem abnehmend ist).

Die dargestellten Sachverhalte basieren auf der Betrachtung des Verkehrs von Personenkraftfahrzeugen. Eine Betrachtung des Schwerverkehrs führt jedoch zum gleichen Ergebnis. Betriebs- und Zeitkosten generieren über 92 % der Kosten. Mit Unfall- und CO₂-Kosten erhöht sich der Wert auf über 98 %. Die Schadstoffe verursachen zwar deutlich höhere Kosten im Vergleich zum Pkw-Verkehr, bleiben jedoch trotzdem unter 2 % absolut. Infolge der Einschränkungen steigen auch im Schwerverkehr die Zeitkosten deutlich an und überholen die Betriebskosten, die Summe aus beidem wächst jedoch gleichzeitig, wenn auch nur gering, auf ca. 95 %. Mitsamt Unfall- und CO₂-Kosten beträgt der Kostenanteil weiter über 98 %.

Für einen Mischverkehr, wie er in der Praxis zu erwarten ist, bedeutet das, dass ein Fall zwischen den beiden Möglichkeiten eintreten wird. Da die Randbedingungen in beide Richtungen praktisch identisch sind, wird es hier zu keinen größeren Abweichungen kommen.

Der Verlauf der Kosten der Nutzenkomponenten ist von den Ausgangsdaten aus gesehen positiv. Das heißt, Änderungen führen zu einem Anstieg der Kosten. Das bedeutet insbesondere, dass der *Status quo ante* der bessere Fall ist. Begründen lässt sich das im Einschwingen eines optimierten Zustands. Vor dem Hintergrund der durch die rechtlichen und lokalen Gegebenheiten erzeugten Randbedingungen wird sich der Verkehr von alleine in einen nutzenoptimierten Zustand bringen. Hier folgt der Verkehr dementsprechend dem ökonomischen Prinzip. Die Verkehrsteilnehmer suchen von sich aus die für sie wirtschaftlichste Alternative.

6.1.6 Wirtschaftliche Bedeutung der Verkehrsinfrastruktur

Ziel der Bewertung des Status quo ist auch hier, die ordinale Beziehung der einzelnen betrachteten Werte untereinander zu bestimmen. Eine monetäre Bezifferung ist, unter Verwendung entsprechender Kostenkennwerte, jedoch möglich. Die Kostenkennwerte müssen an den Betrachtungszeitraum angepasst werden. Für jährliche Berechnungen müssen sie demzufolge jährlich aktualisiert werden. Für den hierarchischen Zusammenhang ist dies nicht notwendig. Hier sind die Abstände der Kennwerte untereinander maßgebend. Diese sind, bei gleichem jährlichem Kostenverlauf, stets identisch. Als Zielkenngröße wird im Folgenden keine monetäre Größe

verwendet, sondern eine dimensionslose Zahl, welche die Leistung des Verkehrs ausdrückt. Die Größe kann vereinfachend auch mit der Einheit Leistungseinheit [LE] beschrieben werden.

Basierend auf den bisherigen Untersuchungen werden nur solche Kenngrößen verwendet, die bei gleichmäßigem Verkehr unterschiedlicher Betrachtungsstellen eine Wirkung haben. Dabei handelt es sich um die Betriebskosten, aufgeteilt in Grundwerte und den Kraftstoffverbrauch sowie die Zeitkosten. Diese drei Werte differieren je nach Fahrzeugtyp. Damit können die Kennwerte als horizontale und die Fahrzeugtypen als vertikale Gliederung verstanden werden.

Die Fahrzeugtypen, die zugrunde gelegt werden, entsprechen denen der Zählstellen der BAST. Sie lassen sich aus der folgenden Abbildung entnehmen. Die Fahrzeuggruppen, die für die Leistungsberechnung verwendet werden, entsprechen denen der *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen*, ebenso wie die Relationen der Kostensätze. Für die Kraftstoffe werden die entsprechenden Formeln des *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1*³⁵³ verwendet. Damit entsprechen die Eingangsgrößen der einschlägigen Fachliteratur.

Fahrzeugtypen nach BAST	Fahrzeuggruppen nach EWS	Fahrzeuggruppen nach HBEFa 2.1	Fahrzeuggruppen nach EWS
	Betriebskosten-Grundwerte	Betriebskosten-Kraftstoffe	Zeitkosten
Pkw ohne Anhänger	Personenkraftwagen	Personenkraftwagen	Personenkraftwagen
Zweiräder	Leichter Lastkraftwagen	Leichte Nutzfahrzeuge (zul. GG < 3,5t)	Lastkraftwagen
Pkw mit Anhänger	Sonstiger Lastkraftwagen		Lastzug
Lieferwagen	Lastzug	Schwere Nutzfahrzeuge ohne Busse	Bus
Sonstige	Bus		
Lkw ohne Anhänger		Bus	
Sattelzüge			
Lkw mit Anhänger			
Busse			

Tabelle 6-5: Fahrzeugtypen und -gruppen für die verschiedenen Daten- und Kostensätze

Da die Fahrzeuggruppen nicht mit den Fahrzeugtypen übereinstimmen, ist für jeden Kostensatz eine individuelle Transformation notwendig, welche die Fahrzeugtypen in eine entsprechende Fahrzeuggruppe überträgt. Mit den unterschiedlichen Fahrzeuggruppen j für die verschiedenen Kostensätze i kann eine einzelne Fahrzeuggruppe beschrieben werden als FzG_j^i , wobei gilt:

$$FzG_j = \sum_{k=a}^b FzT_k$$

Formel 6-15: Beziehung von Fahrzeugtypen gegenüber Fahrzeuggruppen

³⁵³ UBA Berlin, BUWAL Bern, UBA Wien: *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1*, mit der Unterstützung von Mario Keller, Peter de Haan et al. (Bern, 2004), Dokumentation.

Fahrzeuggruppen unterschiedlicher Kostensätze können gleich sein, müssen sie jedoch nicht. Es gilt der folgende Ausdruck, der eine unabhängige Betrachtung der Fahrzeuggruppen bzw. der übergeordneten Kostensätze impliziert:

$$FzG_j^{i=p} = V \neq FzG_j^{i \neq p}$$

Formel 6-16: Beziehung von Fahrzeuggruppen gleicher Typen unterschiedlicher Kostensätze

Die Fahrzeugtypen können als Vektor verstanden werden. Dann können die resultierenden Fahrzeuggruppen einzelner Kostensätze wiederum ebenfalls als Elemente eines Vektors (dem kostensatzspezifischen Mengenvektor) verstanden werden. Diese 3 Vektoren können, zumindest theoretisch, zu einer Matrix (der Mengematrix) zusammengefasst werden.

Analog zu diesem Vorgehen der Mengen können die Kennwerte, welche die Zusammenhänge zwischen den Kostenkennwerten ausdrücken, ebenfalls in diese Form gebracht werden. Das Ergebnis ist eine Matrix gleicher Form. Diese Kennwert-Matrix KW folgt schon aus der Genese der Form der Fahrzeuggruppenmatrix FzG und kann geschrieben werden als KW_j^i , mit i als horizontaler und j als vertikaler Ausrichtung.

Im nächsten Schritt werden die beiden Matrizen FzG und KW miteinander multipliziert. Das Ergebnis ist dann die Matrix L_j^i , welche die Leistungskennwerte enthält.

$$FzG_j^i \otimes KW_j^i = L_j^i$$

Formel 6-17: Multiplikative Verknüpfung zur Berechnung der Leistungskennwerte

Die Multiplikation muss elementweise erfolgen. Die resultierende Matrix ergibt sich dann durch Multiplikation der jeweils entsprechenden Einträge der beiden Ausgangsmatrizen. Diese Form der Multiplikation von Matrizen entspricht dem Hadamard-Produkt.

$$FzG_j^i \circ KW_j^i = L_j^i$$

Formel 6-18: Berechnung der Leistungskennwerte mittels Hadamard-Produkts

Die resultierende Leistungskennwertmatrix kann wiederum als Verknüpfung der drei Leistungskennwertvektoren der Betriebskosten-Grundwerte, der Betriebskosten-Kraftstoffe und der Zeitkosten verstanden werden. Im letzten Schritt werden die Elemente dieser Vektoren addiert. Mathematisch geschieht dies durch die Bildung des Skalarprodukts der Vektoren mit dem Einsvektor J. Der Einsvektor ist der Vektor, dessen Elemente alle den Wert 1 enthalten. Er bildet sich durch Addition der Einheitsvektoren. Es gilt für den n-dimensionalen Raum:

$$J_{n1} = \sum_{i=1}^n \vec{e}_i = \begin{pmatrix} 1 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \dots \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Formel 6-19: Bildung des Einsvektors

Es lassen sich nun die j-dimensionalen Leistungskennwertvektoren mit gleichdimensionalen Einsvektoren skalarmultiplizieren und somit die resultierenden Leistungskennwerte für Betriebskosten (Grundwerte und Kraftstoff) sowie die Zeitkosten bestimmen.

$$L^i = L_j^i \cdot J_{n1} = L_j^i \cdot \sum_{i=1}^n \vec{e}_i \xrightarrow{n=j} L_j^i \cdot J_{j1} = L_1^i + L_2^i + \dots + L_n^i$$

Formel 6-20: Verknüpfung des Einsvektors mit den Leistungskennwerten

Die drei resultierenden Werte können zudem addiert werden und so die Leistung in Abhängigkeit von den drei untersuchten Kostensätzen bestimmt werden. Diese Leistung kann anschließend zu Vergleichszwecken oder als Grundlage für zusätzliche Berechnungen verwendet werden, bspw. um die spurbezogene Leistung zu berechnen.

$$L = \sum_{i=1}^3 L_i = L_1 + L_2 + L_3$$

Formel 6-21: Bestimmung der Leistung in Abhängigkeit von den drei Kostensätzen für einen betrachteten Datenpunkt

6.1.6.1 Bewertung der Straßeninfrastruktur

6.1.6.1.1 Bestimmung der Leistung nach Querschnitt (gesamte Fahrbahn)

In der folgenden Leistungsuntersuchung soll das Netz der deutschen Autobahnen über den jeweiligen Querschnitt untersucht werden. Dem Querschnitt wird eine gleichmäßige Auslastung unterstellt. Das bedeutet, dass das Rechtsfahrgebot außer Acht gelassen wird. Um die abgewickelte Leistung zu untersuchen, ist das legitim, anders als bei Untersuchungen, die bspw. die Abnutzung der Fahrbahn bestimmen, da hier der tatsächliche Ort der Belastung Berücksichtigung finden müsste. Betrachtet werden in der Untersuchung die Autobahnen mit vier (RQ 31) und sechs (RQ 36) Spuren (sowie die Mischform mit fünf). Diese machen den größten Teil des Netzes aus und besitzen eine vergleichbar große Anzahl an Datenpunkten. Für die allgemeinen Aussagen werden dagegen sämtliche Querschnitte berücksichtigt.

Die Leistungen werden in den Normallastverkehr sowie den Schwerlastverkehr unterschieden. Entsprechend der Differenzierung nach Schwerlastverkehr im Sinne der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) gilt als Normallastverkehr sämtlicher Verkehr, der nicht durch den Schwerlastverkehr abgedeckt wird.

Im Folgenden werden die Verteilungen der Leistungskennwerte über den Bereich der Messpunkte dargestellt. Auf diese Art soll auch ein Überblick über die Aussagekraft der Kennwerte gegeben werden, da sie so in dieser Form noch nicht verwendet wurden. Die folgende Abbildung zeigt die Leistung, die vom Normallastverkehr erzeugt wird. Sie ist aufsteigend sortiert. Ein jeder Messpunkt wird durch Summation der Zeitkosten, der Kraftstoffkosten und der Betriebskosten-Grundwerte in Form von Leistungseinheiten dargestellt.

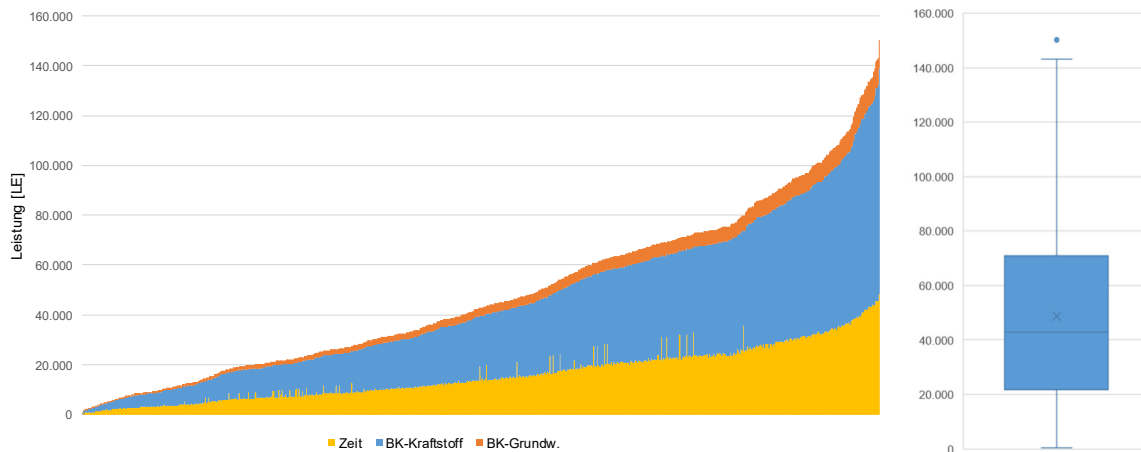


Abbildung 6-11: Leistung des Schwerlastverkehrs, aufsteigend sortiert (links) und die entsprechende Verteilung (rechts)

Während es im linken Bereich Zählstellen gibt, die einen sehr geringen Schwerlastverkehr abwickeln, steigen die Werte im Verlauf stark an. Der Median liegt bei 42.751 LE, die Bandbreite ist jedoch sehr groß, sie reicht von 271 LE (Minimum) bis 150.271 LE (Maximum). Der Abstand vom ersten zum dritten Quartil reicht von 21.667 LE bis 70.922 LE.

Die folgende Abbildung zeigt die Leistung, die vom Normallastverkehr erzeugt wird, ebenfalls aufsteigend sortiert. Die Darstellung jedes Messpunkts berücksichtigt auch hier Zeitkosten, Kraftstoffkosten und Betriebskosten-Grundwerte in Form von Leistungseinheiten.

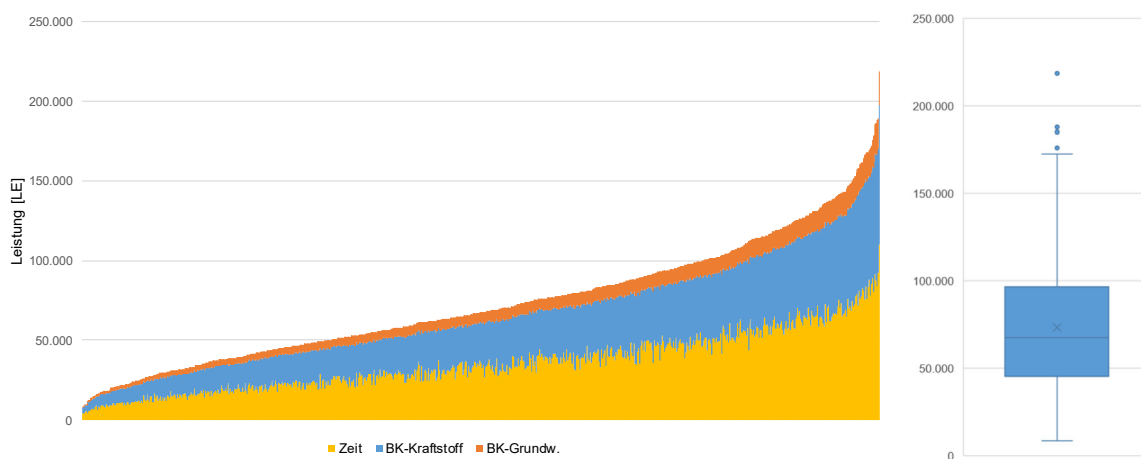


Abbildung 6-12: Leistung des Normallastverkehrs, aufsteigend sortiert (links) und die entsprechende Verteilung (rechts)

Der Verlauf der Leistungen über die Messpunkte ist dem Schwerlastverkehr im Grunde nach ähnlich. Der Median liegt bei 67.383 LE und damit 57,62 % höher als im Bereich des Schwerlastverkehrs. Die Bandbreite reicht von 8.351 LE (Minimum) bis 218.729 LE (Maximum), der Abstand vom ersten zum dritten Quartil reicht von 45.316 LE bis 96.306 LE. Damit ist das erste bzw. dritte Quartil 109,14 % bzw. 35,79 % über dem Äquivalent des Schwerlastverkehrs gelegen. Die Leistung des Normallastverkehrs ist demzufolge höher als die des Schwerlastverkehrs.

Überlagert man die beiden Fälle des Normallast- und des Schwerlastverkehrs, so ergibt sich das folgende Bild. Es entspricht mathematisch schlicht der Überlagerung der beiden vorhergehenden Fälle und stellt ein Bild des gesamten realen Verkehrs dar.

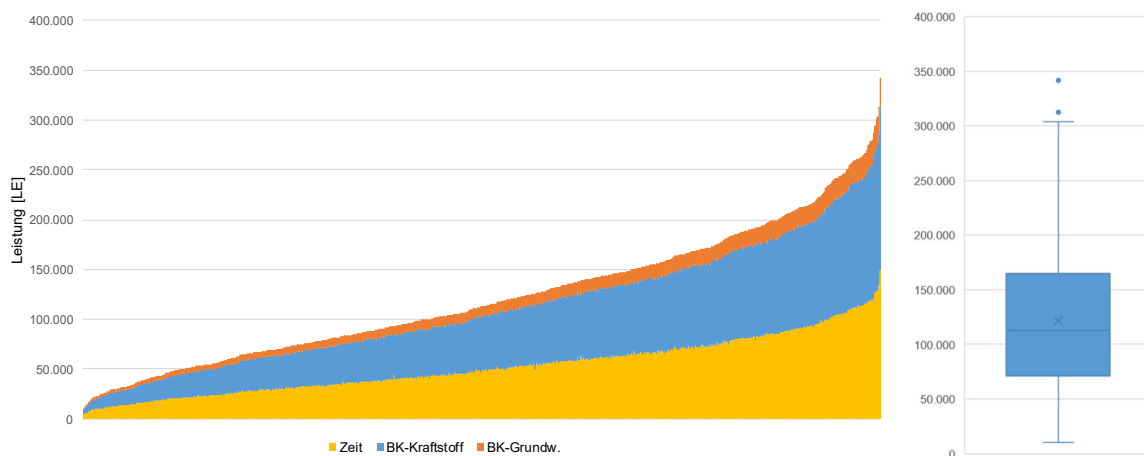


Abbildung 6-13: Leistung des gesamten Verkehrs, aufsteigend sortiert (links) und die entsprechende Verteilung (rechts)

Diese Darstellung zeigt anschaulich, dass Leistungen bis zu 341.917 LE erreicht werden. Der Median liegt jedoch deutlich darunter, bei 112.765 LE. Das bedeutet, dass die Leistung im Allgemeinen weit unter dem Maximalwert liegt, wie es auch in der Abbildung ersichtlich ist. Für einen großen Teil des Netzes lassen sich demzufolge Potentiale annehmen.

Im Folgenden sei die leistungsspezifische Zusammensetzung aus Schwerlast- und Normallastverkehr unter aufsteigender Gesamtleistung gegeben.

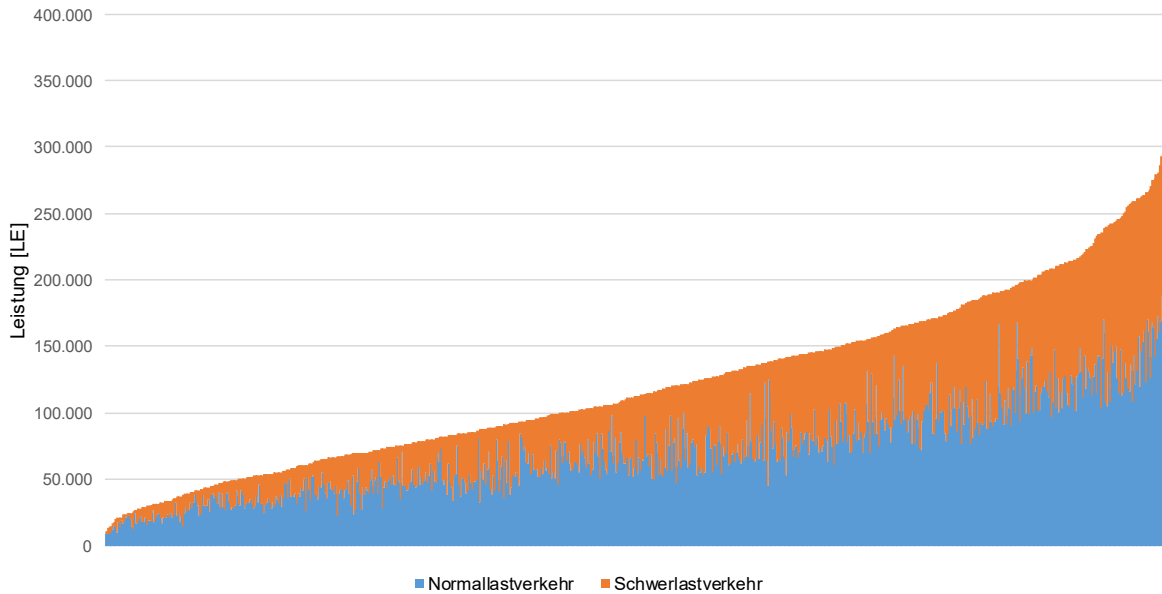


Abbildung 6-14: Leistung des gesamten Verkehrs, aufsteigend sortiert, differenziert nach Normallast- und Schwerlastverkehr

Wie der inhomogene Verlauf der Grenze zwischen den Verkehrsarten zeigt, ist keine eindeutige Zuordnung zwischen Schwerlastverkehr und Normallastverkehr vorhanden, wenngleich eine Tendenz erkennbar ist. So steigt mit steigender Gesamtleistung der Normallastverkehr. Erst durch Hinzuziehen des Ortes der Entstehung der Leistung lassen sich Gemeinsamkeiten erkennen. So existieren, wie später gezeigt wird, durchaus Gebiete mit sehr hohem bzw. sehr niedrigem Schwerlastverkehr.

Der Anteil des Schwerlastverkehrs an der Gesamtleistung reicht von 3 % bis 68 %. In der folgenden Abbildung ist der Anteil des Schwerlastverkehrs auf der linken Seite absteigend dargestellt. Auf der rechten Seite sind die entsprechenden Mengen gegenübergestellt.

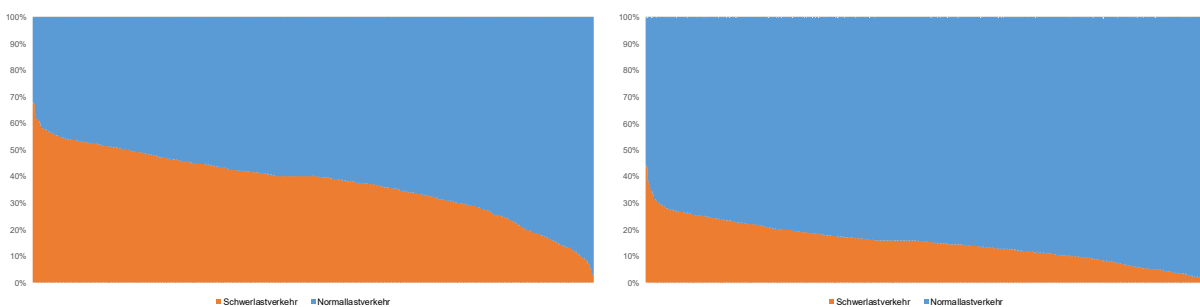


Abbildung 6-15: Darstellung der Leistung (links) bzw. der Mengen (rechts) des gesamten Verkehrs in anteiliger Abhängigkeit vom Schwerlastverkehr, absteigend sortiert

Es zeigt sich, dass die Leistung des Schwerlastverkehrs durch einen mengenmäßig deutlich geringeren Anteil an Fahrzeugen erzeugt wird. Das liegt vor allem darin begründet, dass dem Schwerlastverkehr ein größerer wirtschaftlicher Nutzen als dem Normallastverkehr unterstellt wird.

Lediglich 15 % der Fahrzeuge sind dem Schwerlastverkehr zuzuordnen, ihr Anteil an der Gesamtleistung beträgt jedoch 38 %. Das bedeutet gleichzeitig, dass die Leistung des Normallastverkehrs, der insbesondere durch die klassischen Pkw repräsentiert wird, 62 % ausmacht.

Wird der Ort der Leistungsmessung in die Betrachtung miteinbezogen, so lassen sich regionale Disparitäten erkennen. In der folgenden Abbildung sind alle Zählstellen dargestellt, an denen die Leistung des Schwerlastverkehrs einen Anteil von mindestens 50 % ausmacht.



Abbildung 6-16: Bereiche größten Anteils des Schwerlastverkehrs an der Gesamtleistung (Anteil ab 50 %)

Mit der Betrachtung der Abbildung 6-16 wird die Bedeutung Deutschlands als Transitland deutlich. So befinden sich Punkte an den Grenzübergängen zu Dänemark, Polen, Tschechien, Österreich, Frankreich, Belgien und den Niederlanden. Das entspricht sieben der neun Anrainerstaaten. Zudem lassen sich die Transitautobahnen erkennen. In West-Ost-Richtung die A 2 sowie die A 6. In Nord-Süd-Richtung die A 7 und die A 61. Diese Autobahnen verbinden national bedeutende Metropolregionen und international die innereuropäischen Länder bspw. mit dem Hafen Rotterdams.

Weniger überraschend ist die Verteilung der Leistungskennwerte auf die Querschnitte. So sind die Kennwerte für vierspurige Querschnitte (RQ 31) geringer (in der Abbildung blau) als bei den sechsspürigen Querschnitten (RQ 36; in der Abbildung 6-17 grau). Die gemischten Abschnitte mit

fünf Spuren sind dazwischen angesiedelt. Das bedeutet für die verkehrsökonomische Betrachtung, dass die Dimensionierung entsprechend sinnvoll gewählt wurde. Je größer der Querschnitt, desto höher die potentielle Leistung. In der folgenden Abbildung werden die Verteilungen graphisch dargestellt. In grün auf der rechten Seite die kumulierte Betrachtung.

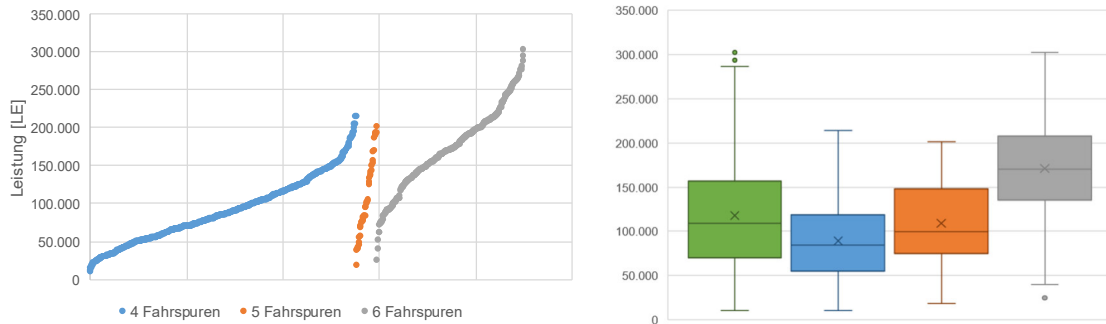


Abbildung 6-17: Verteilung der Leistung über die Zählstellen in Abhängigkeit von den Querschnitten (links) sowie deren Häufung (rechts)

Die Verteilungen, wie sie bisher beschrieben wurden, können durch Division mit dem Querschnitt selbst auch spurbezogen dargestellt werden. Die tatsächliche spurbezogene Verteilung kann so jedoch nicht bestimmt werden. Die notwendigen Informationen für die Verteilung über den Querschnitt sind nicht bekannt. Der Schwerlastverkehr eines sechsspürigen Querschnitts kann so bspw. nicht auf die sechs Fahrspuren verteilt werden. Es ist davon auszugehen, dass er stattdessen nur auf den jeweils rechten Fahrspuren abgewickelt wird, das entspricht zwei der sechs Spuren. Der Normallastverkehr auf der anderen Seite wird sich auf die verbliebene Fahrbahn konzentrieren. Die jeweils rechte Spur wird er in Abhängigkeit von der Leistung des Schwerlastverkehrs und des Querschnitts wahrnehmen. Eine Leistungsberechnung je Spur hätte daher zufolge, dass die Werte der Querschnitte schlicht durch die Anzahl der Fahrspuren dividiert würden. Die verwertbaren Ergebnisse wären dann mit den bisherigen dem Grunde nach identisch.

6.1.6.1.2 Ableitung einer hierarchischen Ordnung der Querschnitte

Die Straßeninfrastruktur weist abseits der Ingenieurbauwerke gegenüber diesen einen Sonderfall auf. So ist für die Betrachtung der Strecken eine längenspezifische Betrachtung interessant. Die klassischen Ingenieurbauwerke weisen gegenüber den über bzw. durch sie geführten Strecken vernachlässigbare Längen auf. Sie können daher punktuell verteilt angenommen werden. Für Autobahnen, deren Belastungen punktuell erfasst werden, ist die Länge jedoch nicht vernachlässigbar. Um Aussagen in Bezug auf die Länge zu ermöglichen, ist daher die Annahme der Verteilung zwischen den Zählstellen nötig, um so längenbezogene Aussagen tätigen zu können.

6.1.6.1.2.1 Punktbezogene Hierarchie

Die punktbezogene Betrachtung bezieht sich direkt auf die analysierten Daten der Zählstellen. Letztlich gibt es verschiedene Arten der Aufbereitung. Wie bereits gezeigt wurde, kann eine große Zahl an Aussagen bezüglich des abgewickelten Verkehrs getätigt werden. Durch die unterschiedlichen Gewichtungen geht die Verteilung der Zusammensetzung des Verkehrs in die Leistung ein. Dementsprechend wird auf eine Aufgliederung an dieser Stelle verzichtet. Ebenso ist die Betrachtungsgröße variabel. Der Konsistenz wegen wird weiterhin der Querschnitt betrachtet. Das bedeutet, dass die Leistungsgrößen absolut betrachtet werden. Relative Größen, wie sie die Betrachtung je Fahrspur zulassen, sind dagegen interessant für Potentialbetrachtungen.

Die folgende Karte zeigt die Leistung, die an den Zählstellen erbracht wurde. Je stärker der Farbpunkt im roten Bereich liegt, desto höher ist die abgewickelte Leistung. Die unterschiedliche lokale Dichte der Zählstellen wirkt sich dabei nicht auf die Farbgebung aus, wenngleich sie das Gesamtbild beeinflusst. Bis zu einem gewissen Grad spiegelt die Dichte der Zählstellen die Dichte der Kreuzungen und Abzweigungen wider.

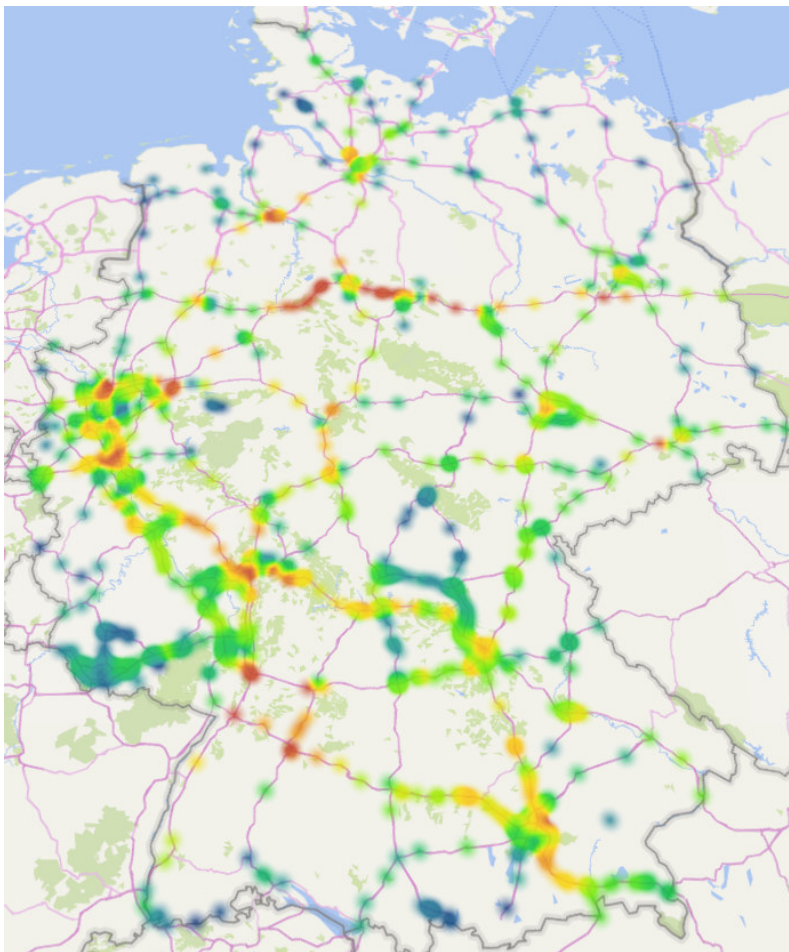


Abbildung 6-18: Heatmap der abgewickelten Leistung des gesamten Verkehrs

Hohe Leistungen werden demnach in den Bereichen der großen Städte erbracht. Zudem lassen sich starke Leistungsabwicklungen im Bereich der Ost-West-Transit-Achse (A 2, A 6) erkennen sowie über das Mittelrheintal und das Ruhrgebiet zur deutsch-niederländischen Grenze.

In der folgenden Tabelle ist der obere Bereich der hierarchischen Struktur der einzelnen Zählstellen gegeben. Die abgewickelte Leistung nimmt dabei mit zunehmender Ordnungszahl ab. Die Zählstellen lassen sich zwar mittels Koordinaten exakt lokalisieren, in der qualitativen Beschreibung ist eine eindeutige Zuordnung dagegen schwierig, da die Ortschaften Autobahnen in der Regel nur tangieren. Neben Autobahnnummer und Bundesland sind daher der namensgebende Ort (in der Regel mit bezeichnendem Knotenpunkt) sowie ein Nah- und Fernziel in beide Richtungen angegeben.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Lfd.-Nr.	Zählstellen-Nr.	Name	Bundesland	Straßen nr. (BAB)	Fernziel R1	Nahziel R1	Fernziel R2	Nahziel R2
1	5672	AD Heumar (N)	NW	3	Oberhausen	AK Kreuz Köln-Ost (A4)	Köln	AD Dreieck Heumar (A4/A59)
2	8023	Karlsruhe 1	BW	5	Karlsruhe	AS Karlsruhe-Mitte	Weil am Rhein	AD Dreieck Karlsruhe (A8)
3	5665	AK OB-West (N)	NW	3	Emmerich	AS Oberhausen-Holten	Oberhausen	AK Kreuz Oberhausen-West (A42)
4	5004	Leverkusen	NW	3	Oberhausen	AS Leverkusen	Köln	AS Köln-Mülheim
5	8073	Stuttgart-Vaihingen	BW	8	Stuttgart	AK Kreuz Stuttgart (A8/A831)	Karlsruhe	AS Leonberg-Ost
6	5676	AK Leverkusen (S)	NW	3	Oberhausen	AK Kreuz Hilden (A46)	Köln	AS Solingen
7	5070	Oberhausen-Holten	NW	3	Emmerich	AK Kreuz Oberhausen (A2/A516)	Oberhausen	AS Oberhausen-Holten
8	5026	Oberhausen-Sterkrade	NW	2	Dortmund	AK Oberhausen-Königshardt	AK Oberh. (A3/A516)	AK Kreuz Oberhausen (A3/A516)
9	6821	AK Frankfurt NW (N)	HE	5	AD Hattenbach (A7)	AK Bad Homburger Kreuz (A661)	Frankfurt a. Main	AK Nordwestkreuz Frankfurt a. Main (A66)
10	5667	AK OB-West (S)	NW	3	Oberhausen	AK Kreuz Oberhausen-West (A42)	Köln	AS Oberhausen-Lirich
11	2401	HB-Weserbrücke	HB	1	Hamburg	AS Bremen-Hemelingen	Münster	AS Bremen-Arsten
12	2229	AD HH-Nordwest (S)	HH	7	Flensburg	AD Dreieck Hamburg-Nordwest (A23)	Hamburg	AS Hamburg-Stellingen
13	3490	Gümmmer	NI	2	Hannover	AS Garbsen	Dortmund	AS Wunstorf-Luthe
14	9211	Aschheim/Ismaning (S)	BY	99	Autobahnring München	AS Kirchheim	Autobahnring München	AS Aschheim/Ismaning
15	5049	Rheinbr. Rodenkirchen	NW	4	Olpe	AS Köln-Poll	Aachen	AK Kreuz Köln-Süd (A555)
16	3439	Hannover-Bothfeld	NI	2	Braunschweig	AS Hannover-Lahe	Dortmund	AS Hannover-Bothfeld
17	3489	Immensen	NI	2	Braunschweig	AS Hämelerwald	Hannover	AS Lehrte-Ost
18	9218	Aschheim-West	BY	99	AK München/Brunnthal	AS Aschheim/Ismaning	Autobahnring München	AK Kreuz München-Nord (A9)
19	6854	AD Mönchhof (O)	HE	3	Köln	AD Mönchhof-Dreieck (A67)	Würzburg	AS Kelsterbach
20	3485	Schwülper	NI	2	Braunschweig	AS Braunschweig-Hafen	Hannover	AS Braunschweig-Watenbüttel
21	6808	AD Hattenbach (N)	HE	7	Kassel	AS Kirchheim	Fulda	AD Hattenbach (A5)
22	6856	Frankfurter Kreuz (W)	HE	3	Köln	AK Frankfurt a. Main-Flughafen (K823)	Würzburg	AK Frankfurter Kreuz (A5)
23	5144	Unna	NW	1	Münster	AS Kamen-Zentrum	Köln	AS Unna (B1)
24	6859	Hanau	HE	3	Frankfurt a. Main	AS Obertshausen	Würzburg	AS Hanau
25	5101	Hengsen	NW	1	Münster	AK Kreuz Dortmund/Unna (A44)	Dortmund	AS Schwerte
26	3306	Peine	NI	2	Braunschweig	AS Peine	Hannover	AS Hämelerwald
27	9212	AK München-Ost (N)	BY	99	Kreuz Langwied (A8)	AS Kirchheim b. München	AK München/Brunnthal	AK Kreuz München-Ost (A94)
28	6923	Frankfurt-Niederrad	HE	5	AD Hattenbach (A7)	AS Frankfurt a. Main-Niederrad	Darmstadt	AS Frankfurt a. Main-Flughafen-Nord (B43)
29	8059	Neckarsulm 1	BW	6	Nürnberg	AK Kreuz Weinsberg (A81)	Heilbronn	AS Heilbronn/Neckarsulm
30	3484	Watenbüttel	NI	2	Braunschweig	AK Braunschweig-Nord	Hannover	AS Braunschweig-Hafen
31	8018	St. Leon	BW	5	Heidelberg	AK Kreuz Walldorf (A6)	Karlsruhe	AS Kronau
32	3604	Michendorf	BB	10	AD Nuthetal	AS Michendorf	AD Potsdam	AS Ferch
33	3837	Alleringersleben	ST	2	Magdeburg	AS Ellisleben	Braunschweig	AS Alleringersleben
34	3456	Uphusen	NI	1	Hamburg	AK Bremer Kreuz (A27)	Münster	AS Uphusen/Mahndorf
35	3421	Beienrode	NI	2	Magdeburg	AS Rennau	Braunschweig	AS Königsutter
36	3486	Meerdorf	NI	2	Braunschweig	AS Braunschweig-Watenbüttel	Hannover	AS Peine-Ost
37	3492	Groß-Munzel	NI	2	Hannover	AS Wunstorf-Kohlenfeld	Dortmund	AS Bad Nenndorf
38	3491	Denensen	NI	2	Hannover	AS Wunstorf-Luthe	Dortmund	AS Wunstorf-Kohlenfeld
39	9039	AK Nürnberg (W)	BY	3	Passau	AK Kreuz Nürnberg (A9)	Nürnberg	AS Nürnberg-Mögeldorf
40	9060	AK Nürnberg (S)	BY	9	Nürnberg	AK Kreuz Nürnberg (A3)	München	AS Nürnberg-Fischbach
41	3305	Lauenau	NI	2	Hannover	AS Bad Nenndorf	Dortmund	AS Lauenau
42	3494	Hattendorf	NI	2	Hannover	AS Lauenau	Dortmund	AS Rehren
43	9505	AS Aschaffenburg (W)	BY	3	Frankfurt a. Main	AS Stockstadt (B469)	Würzburg	AS Aschaffenburg-West (B8)
44	8016	Walldorf	BW	6	Heilbronn	AS Wiesloch/Rauenberg	Mannheim	AK Kreuz Walldorf (A5)
45	3429	Braunschweig-Flughafen	NI	2	Magdeburg	AS Braunschweig-Ost	Hannover	AS Braunschweig-Flughafen
46	4105	Rothschönberg	SN	4	Dresden	AS Wilsdruff	Chemnitz	AD Dreieck Nossen (A14)
47	5053	Köln-Klettenberg	NW	4	Olpe	AS Köln-Klettenberg (B265)	Aachen	AK Kreuz Köln-West (A1)
48	6826	Griesheim	HE	5	Frankfurt a. Main	AS Weiterstadt	Heidelberg	AD Dreieck Darmstadt (A672)
49	5602	Neuss-West	NW	57	Kleve	AS Kreuz Neuss-West (A46/L380)	Köln	AS Neuss-Reuschenberg
50	9057	AK Nürnberg-Ost (N)	BY	9	Nürnberg	AS Nürnberg-Fischbach	München	AK Kreuz Nürnberg-Ost (A6)

Tabelle 6-6: Autobahnzählstellen nach abgewickelter Gesamtleistung (absteigend sortiert, Ausschnitt)

6.1.6.1.2.2 Längenbezogene Hierarchie

Analog zur Tabelle 6-7 kann statt den Messpunkten auch die gesamte Autobahn betrachtet werden. Dazu werden die Leistungskennwerte auf die gesamte Länge bezogen. Berücksichtigt werden dabei nur solche Autobahnen, denen mindestens fünf Messpunkte zugeordnet werden können. Dennoch ist es möglich, dass sich lokale Über- oder Unterbewertungen auf die entsprechenden Autobahnen auswirken. Die punktuelle Betrachtung scheint vor diesem Hintergrund robuster. Ferner sind auf ihrer Basis Aussagen fundierter. Nichtsdestotrotz erscheinen Aussagen über bestimmte Autobahnen greifbarer, wenn sie im Kontext ihres Namens getätigt werden können. In der folgenden Tabelle sind die Autobahnen absteigend geordnet, es handelt sich um alle Autobahnen, die mit mindestens 5 Zählstellen ausgestattet sind.

Pos.	Nr. BAB	Leistungskw	tangierte Bundesländer	Pos.	Nr. BAB	Leistungskw	tangierte Bundesländer
1	2	231.146	BB NI NW ST	26	52	99.170	NW
2	99	190.885	BY	27	96	97.504	BW BY
3	3	187.912	BY HE NW RP	28	72	96.942	BY SN
4	5	171.750	BW HE	29	93	95.556	BY
5	9	165.966	BB BY ST TH	30	48	92.305	RP
6	61	150.952	NW RP	31	24	89.347	BB MV SH
7	40	150.388	NW	32	38	85.276	NI SN ST TH
8	57	149.077	NW	33	27	82.023	HB NI
9	67	148.539	HE	34	66	81.271	HE
10	42	144.492	NW	35	73	81.210	BY TH
11	10	141.476	BE BB	36	94	78.148	BY
12	4	139.842	HE NW SN TH	37	63	77.705	RP
13	81	136.521	BW BY	38	65	74.419	RP
14	1	125.819	HB NI NW RP SH SL	39	39	74.409	NI
15	8	123.055	BW BY RP SL	40	70	67.781	BY
16	6	122.549	BW BY HE RP SL	41	650	65.343	RP
17	7	121.357	BW BY HE NI SH	42	620	62.517	SL
18	45	120.079	BY HE NW	43	33	62.473	NI NW
19	30	119.871	NI NW	44	23	56.819	SH
20	92	116.057	BY	45	623	56.335	SL
21	14	114.039	MV SN ST	46	20	52.380	MV SH
22	46	108.629	NW	47	31	50.297	NI NW
23	44	106.772	HE NW	48	19	49.291	MV
24	60	105.896	HE RP	49	71	44.145	BY TH
25	59	99.424	NW	50	62	29.051	RP SL

Tabelle 6-7: Autobahnen nach abgewickelter durchschnittlicher Gesamtleistung (mind. 5 Messpunkte; absteigend sortiert)

An erster Position befinden sich die Transitautobahnen (A 2, A 3) in Richtung Rotterdam über das Ruhrgebiet. Gefolgt werden sie von der Münchner Stadtfahrt (A 99). Neben dem Zu- und Abverkehr der Stadt weist sie einen Knotenpunkt auf, der die Großstädte Stuttgart und Nürnberg anbindet sowie einen Anschluss nach Salzburg und die Alpenpässe. Es folgen Nord-Süd-Verbindungen, welche die Städte Frankfurt/Main, Mannheim, Karlsruhe (A 5) sowie Berlin, Nürnberg, München (A 9) verbinden, mitsamt den zugehörigen Metropolregionen.

6.1.6.2 Bewertung der Ingenieurbauwerke

6.1.6.2.1 Leistungsbewertung für Tunnel

Für das deutsche Autobahnnetz wurden 109 einzelne, namentlich differenzierte Tunnel erfasst. Das bedeutet, dass mehrröhrige Tunnel als ein Tunnel angesehen werden. Für die Definition eines Tunnels gilt der Wortlaut der DIN 1076.³⁵⁴ 8 der untersuchten Tunnel sind noch nicht in Betrieb, oder weisen eine fehlerhafte oder unvollständige Erfassung der Daten auf. Somit reduziert sich die Anzahl der Tunnel auf 101.

Tunnel werden als punktbezogene Bauwerke betrachtet. Zwar handelt es sich um längenbezogene Bauwerke, d. h. die Geometrie weist gegenüber der Breite eine deutlich größere Länge auf, vor dem Hintergrund der Geometrie der aufbauenden Straße, die in der Regel um ein Vielfaches länger ist, erscheinen die Ingenieurbauwerke jedoch punktuell. So ist der längste deutsche Autobahntunnel, der Rennsteigtunnel, 7.916 m lang. Der zweitlängste (Elbtunnel) ist jedoch nur noch 3.325 m lang. Die Verteilung ist, ohne den Rennsteigtunnel, in der folgenden Abbildung gezeigt.

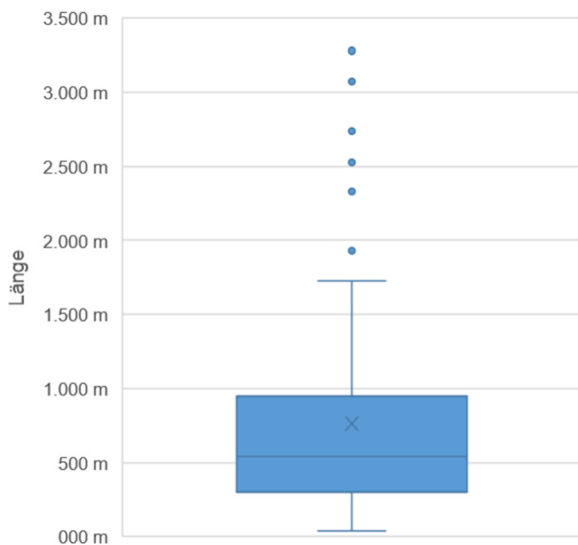


Abbildung 6-19: Verteilung der Längen deutscher Autobahntunnel (exkl. Rennsteigtunnel bei 7.916 m)

Der Rennsteigtunnel wird in den Untersuchungen berücksichtigt, jedoch in der Darstellung ausgeschlossen, da sonst die Erkennbarkeit nicht mehr gegeben ist. Vor dem Hintergrund der Boxplotmethodik ist er ein Ausreißer. Unter dieser Vernachlässigung weisen die Tunnel Längen von 35 m (Minimum) bis 3.325 m (Maximum) auf, im Mittel sind sie 762 m lang, der Median liegt deutlich darunter, bei 541 m.

³⁵⁴ DIN 1076 – Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen: „Tunnel sind dem Straßenverkehr dienende Bauwerke, die unterhalb der Erd- oder Wasseroberfläche liegen und in geschlossener Bauweise hergestellt werden oder bei offener Bauweise länger als 80 m sind.“

Entsprechend der geographischen Lage lassen sich den einzelnen Bauwerken nun Zählstellen zuordnen. Die Nähe von Bauwerk zu Zählstelle ist mitunter weitläufiger, teilweise aber auch in direkter Nähe. Da nicht alle Tunnel in unmittelbarer Nähe eine Zählstelle vorweisen können, kann es gegenüber den tatsächlichen Messwerten zu Unterschieden kommen, welche sich ohne aktive Messungen jedoch nicht umgehen lassen.

Anschließend lassen sich auch für die Tunnel entsprechende Leistungskennwerte bestimmen. Das Vorgehen entspricht dabei jenem beschriebenen aus dem Bereich der Straßen. Auf der Bestimmung der Kennwerte aufbauend, lässt sich auch hier eine Hierarchie ableiten. Die Verteilung der Leistungskennwerte kann der folgenden Abbildung entnommen werden.

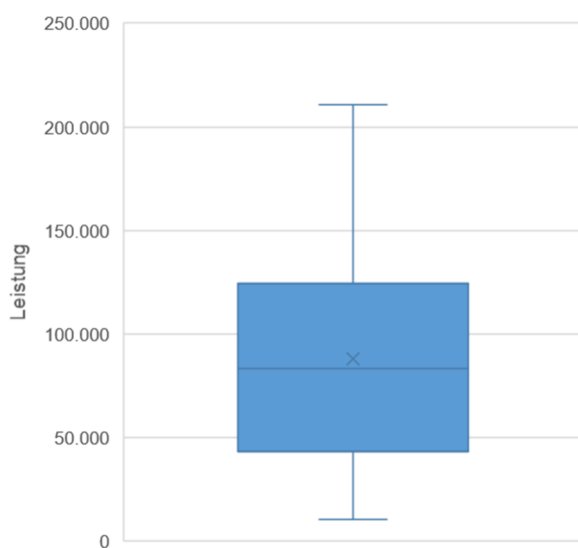


Abbildung 6-20: Verteilung der Leistung des gesamten Verkehrs in Tunnelbauwerken

Die Verteilung zeigt Leistungskennwerte von 10.643 LE (Minimum) bis 210.729 LE (Maximum) auf. Mittelwert und Median liegen nahe beieinander bei 88.187 LE bzw. 85.726 LE. Die Verteilung entspricht damit im Allgemeinen der Verteilung der Zählstellen der vier- bis sechsspurigen Straßen, wenngleich hier sämtliche Zählstellen, auch mit abweichender Spuranzahl Berücksichtigung finden. Die Tunnelbauwerke sind damit, nach Leistungsaspekten, homogen über die Straßeninfrastruktur verteilt. In der folgenden Heatmap sind die Tunnel farblich nach Leistung dargestellt.

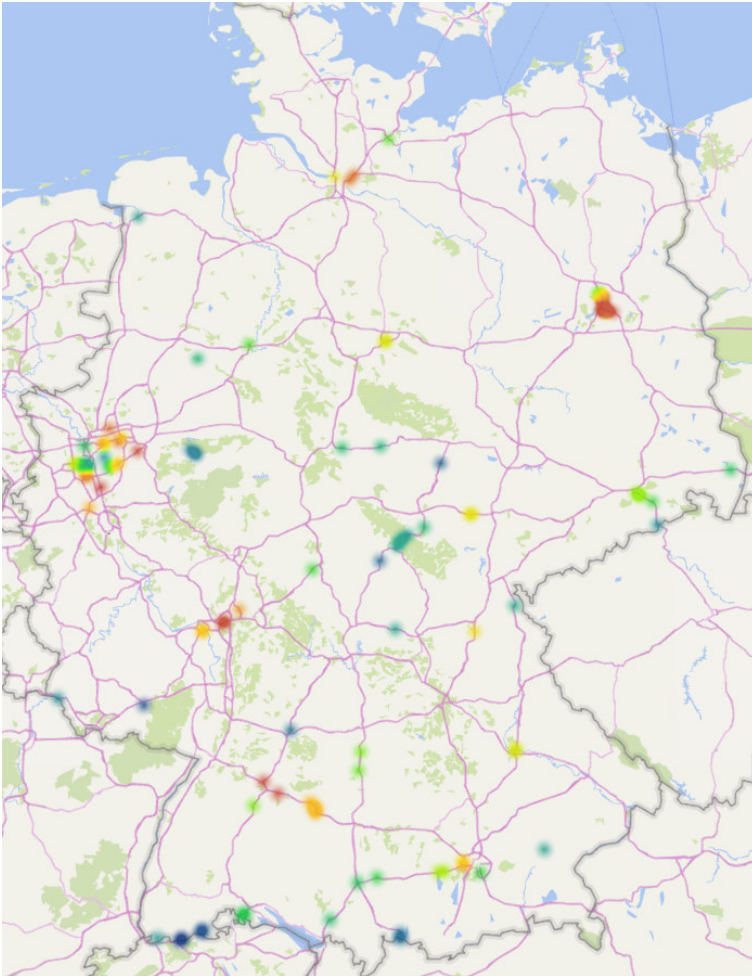


Abbildung 6-21: Heatmap der abgewickelten Leistung des gesamten Verkehrs innerhalb der Tunnelbauwerke

Hohe Verkehrsleistung wird dementsprechend zwischen Stuttgart und München (A 8) bei Frankfurt/Main (u.a. A 3), Berlin (A 100, A 111) Hamburg (A 1, A 7) und im Süden und Osten des Ruhrgebietes (A 1, A 2, A 3, A 40) erbracht. Die Zuordnung zu Autobahnen selbst ist aufgrund des punktuellen Charakters dabei nur bedingt aussagekräftig, auch hier empfiehlt es sich, das Bauwerk als solches zu betrachten.

In der folgenden Tabelle ist die abgeleitete Hierarchie dargestellt. Sie umfasst 101 eigenständige Tunnelbauwerke mitsamt zugehöriger Straßennummer, Bundesland, Name, Ort und ermitteltem Leistungskennwert.

1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Pos.	Bundesl	Straße	Name	Ort	Leistungskw	Pos.	Bundesl	Straße	Name	Ort	Leistungskw
1	BE	A 100	Rathenauplatz	Berlin	210.729	51	BW	A 81	Schönbuch	Herrenberg	83.235
2	BE	A 100	Schlangenbader Straße	Berlin	189.862	52	BW	A 7	Vimgrund	Ellwangen	82.650
3	BE	A 100	Innsbrucker Platz	Berlin	189.862	53	BW	A 7	Agnesburg	Aalen	78.560
4	BE	A 100	Wexstraße	Berlin	189.862	54	SH	A 20	Tunnel Moising	Lübeck	75.641
5	BW	A 81	Engelberg Basis	Leonberg	175.006	55	NW	A 30	Hahnenkamp	Bad Oeynhausen	73.860
6	HE	A 3	Rollwegbrücke Ost	Kelsterbach, Frankf	166.740	56	BE	A 111	Beyschlagsiedl.	Berlin	71.514
7	HE	A 3	Rollwegbrücke West	Kelsterbach, Frankf	166.740	57	BE	A 111	Forstamt Tegel	Berlin	71.514
8	BW	A 8	Messtunnel	Stuttgart	166.099	58	HE	A 66	Tunnel Neuhof	Neuhof	68.951
9	NW	A 3	Leichlingen	Leichlingen	164.612	59	SN	A 17	Meuschaer Höhe	Dohna	68.177
10	NW	A 1	Vorhalle	Hagen	164.211	60	BY	A 8	Neubiberg	München-Unterhach	66.825
11	BE	A 100	Tunnel Ortsteil Britz	Berlin	163.188	61	BY	A 96	Kohlberg	Erkheim	63.304
12	BE	A 111	Flughafen Tegel	Berlin	151.827	62	BE	A 103	Feuerbachstr.	Berlin	62.770
13	BE	A 111	Tegel (Ortskern)	Berlin	151.827	63	BW	A 81	Hohentwiel	Singen	59.888
14	BE	A 111	Ernststraße	Berlin	151.827	64	BW	A 81	Heilsberg	Gottmadingen	59.888
15	NW	A 2	Erle	Gelsenkirchen	145.974	65	BY	A 7	AK Memmingen	Memmingen	57.916
16	NW	A 40	Ruhrschnellweg	Essen	145.683	66	SN	A 4	Königshainer Berge	Görlitz (Kodersdorf)	56.620
17	NW	A 448	Tunnel Rombacher Hütte	Bochum - Stahlhaus	145.683	67	NW	A 59	Mercatorunnel	Duisburg	56.053
18	HH	A 1	Billwerder Moorfleet	Hamburg	144.433	68	BW	A 96	Herfatz	Wangen	52.857
19	SH	A 1	Barsbüttel	Barsbüttel	144.433	69	NI	A 38	Heidkopftunnel	Friedland	51.899
20	NW	A 46	Universität	Düsseldorf	138.541	70	NW	A 535	Im großen Busch	Wuppertal	49.583
21	NW	A 46	Wersten	Düsseldorf	138.541	71	TH	A 71	Behringen	Behringen	49.486
22	NW	A 46	Galerie Hansastraße	Wuppertal	138.079	72	TH	A 38	Höllbergtunnel	Bernterode	47.624
23	BY	A 96	Graefelfing	München	135.709	73	NI	A 33	LST Dissen	Dissen	47.499
24	HE	A 661	Galerie Seckbach	Frankfurt	133.844	74	NW	A 44	Flughafen	Düsseldorf	44.270
25	NW	A 1	LEH Lövenich	Köln	125.115	75	NW	A 44	Reichswaldallee	Düsseldorf	44.270
26	BW	A 8	Lämmerbuckel	Hohenstadt	123.559	76	NW	A 44	Schwarzbach	Düsseldorf	44.270
27	BW	A 8	Tunnel Gruibingen	Gruibingen	123.559	77	TH	A 71	Hochwald	Zella-Mehlis	42.529
28	BW	A 8	Aichelberg	Kirchheim	123.559	78	BY	A 93	Einhausung Unterweißenbach	Selb	42.220
29	BW	A 8	Nasenfels	Drackenstein	123.559	79	TH	A 71	Berg Bock	Zella-Mehlis	41.165
30	RP	A 60	Tunnel Mainz-Hechtsheim	Mainz	118.015	80	BY	A 70	Schwarzer Berg	Eltmann	40.177
31	RP	A 60	Rampentunnel	Mainz-Hechtsheim	118.015	81	NI	A 31	Emstunnel	Leer	38.809
32	NW	A 46	Galerie Sternenberg	Wuppertal	114.281	82	TH	A 71	Rennsteig	Oberhof	38.417
33	NW	A 40	Grumme	Bochum	110.526	83	TH	A 71	Alte Burg	Gehlbach	38.417
34	BY	A 9	Einhausung Bayreuth	Bayreuth	108.171	84	BY	A 94	Einhausung Wimpasing	Ampfing	38.214
35	TH	A 4	Jagdberg	Jena	105.134	85	BW	A 861	Nollinger Berg	Rheinfelden	36.218
36	TH	A 4	Lobdeburgtunnel	Jena	105.134	86	NW	A 44	Birth	Wersten	35.862
37	BY	A 93	Pfaffenstein	Regensburg	103.927	87	SN	A 17	An der Harthe	Breitenau	34.715
38	HH	A 7	Elbtunnel	Hamburg	103.592	88	SL	A 8	Pellinger-Berg Wellingen	Merzig/ Wellingen	31.194
39	BY	A 99	Aubing	München	103.048	89	NW	A 46	Uentrop	Arnsberg	28.938
40	NI	A 39	Galerie Lindenberg	Braunschweig	102.566	90	NW	A 46	Olpe	Meschede	28.346
41	NI	A 39	Galerie Heidberg	Braunschweig	102.566	91	NW	A 46	Hemberg	Meschede	28.346
42	BY	A 93	Einhausung Prüfening	Regensburg	99.239	92	BW	A 81	Hölzern	Weinsberg	26.008
43	NW	A 44	Rheinschlinge	Ilverich (bei Meerbus	98.326	93	BY	A 7	Tunnel Reinertshof	Füssen	24.306
44	NW	A 44	Strümp	Ilverich (bei Meerbus	98.326	94	TH	A 71	Eichelberg	Ritschenhausen	23.713
45	NW	A 52	Huttrop	Essen	96.036	95	BY	A 7	Grenztunnel	Füssen	22.976
46	BY	A 96	Eiterschlag	Eiterschlag	93.429	96	TH	A 71	Schmücketunnel	Heldrungen/Gorsleb	20.951
47	BY	A 96	Eching	Eching	93.429	97	BW	A 98	Bürgerwald	Tiengen	16.743
48	SN	A 17	Coschütz	Dresden	88.218	98	BW	A 98	Heidenaecker	Lauchringen	16.743
49	SN	A 17	Dölzschen	Dresden	88.218	99	RP	A 62	Hörnchenberg	Landstuhl	15.028
50	SN	A 17	Altfranken	Dresden	88.218	100	BW	A 98	Rappenstein	Laufenburg	10.643
						101	BW	A 98	Groß Ehrstädt	Murg	10.643

Tabelle 6-8: Tunnel nach abgewickelter durchschnittlicher Gesamtleistung (absteigend sortiert)

Die ersten vier Tunnel befinden sich allesamt innerhalb der A 100 in Berlin, die auch hinsichtlich der Fahrzeugmengen die meistfrequentierte Autobahn in Deutschland ist. Drei der vier Tunnel folgen direkt aufeinander, sodass ihre Leistungskennwerte gleich sind. Es folgen der Engelbergbasistunnel in Angelberg bei Leonberg (A 81), die Rollwegbrücken am Flughafen Frankfurt (A 3) sowie der Messtunnel in Stuttgart (A 8).

6.1.6.2.2 Leistungsbewertung für Brücken

Betrachtet man die Brückeninfrastruktur, so fällt ihre extrem hohe Anzahl auf. So existieren über 20.000 Autobahnbrücken, wobei die meisten Überführungsbauwerke kleiner Dimensionen sind. Die klassische Vorstellung einer Brücke, die weite Täler überspannt, trifft dagegen nur auf wenige zu, wie die folgende Abbildung zeigt.

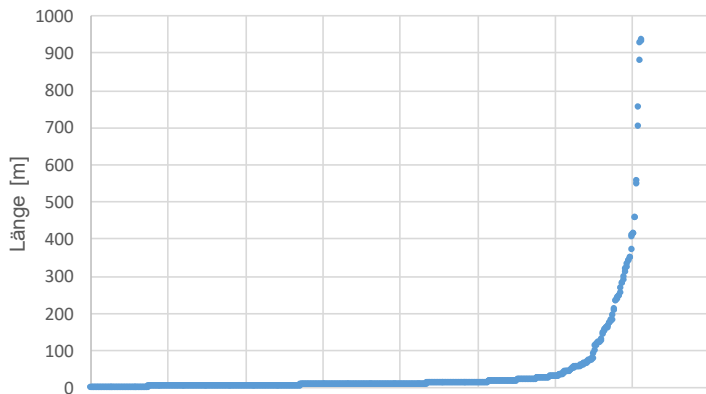


Abbildung 6-22: Verteilung der deutschen Autobahnbrücken in Abhängigkeit von ihrer Länge

Wie auch bei Tunnel, handelt es sich bei Brücken um punktbezogene Bauwerke, gerade aufgrund der überwiegend geringen Längen. Aufgrund der hohen Anzahl und relativ gleichmäßigen Verteilung sind Brücken jedoch über die ganze Länge von Straßen regelmäßig verteilt. Das konkrete Auftreten von Brückenbauwerken gegenüber den Messpunkten lässt eine hohe Streuung der Abstände zwischen ihnen zu. Anders als bei Tunnelbauwerken übersteigt die Brückenanzahl die Anzahl der Datenpunkte um ein Vielfaches. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Bereiche zwischen den Messpunkten, wenigstens mittels Interpolation, abzuschätzen. Dieses Vorgehen profitiert von der Verteilung der Zählstellen, die an Stellen potentiell hoher Zu- oder Abflüsse stärker vertreten sind.

Während die Abbildung der Verkehrsflüsse zwar von der Qualität der Zählstellen abhängig ist, ist die Verteilung gewissermaßen als Nullsummenspiel (im Sinne der Spieltheorie) anzusehen. Keine Elemente verschwinden oder werden vergessen, lediglich der Zeitpunkt, als Ableitung des Weges, kann variieren. Das bedeutet, dass ein Element zwar mit einer gewissen Unschärfe zwischen Wegen wechselt, der Wechsel aber vollzogen wird. Diese Unschärfe kann als Maß der Qualität der Datenpunkte verstanden werden. Je geringer die Unschärfe, desto höher die Qualität der Informationen.

Aufgrund der hohen Anzahl der Brückenbauwerke ist eine Gesamtbetrachtung schwierig und die Darstellung unübersichtlich. Stattdessen werden nur Teilmengen des Gesamtbestandes untersucht. Die Teilmengen können theoretisch beliebig gewählt werden, selbst die Gesamtmenge kann zugrunde gelegt werden, wengleich der Anspruch an die Interpretationsfähigkeit sehr hoch ist. Zur Bildung der Teilmenge kann bspw. die Geometrie herangezogen werden, sodass nur Bauwerke in einem bestimmten Längenbereich untersucht werden. Eine andere Möglichkeit liegt darin, unterschiedliche Strecken separat zu untersuchen. Als realitätsnaher kann dabei diese zweite Möglichkeit angesehen werden. Denn hier wird letztlich eine Strecke untersucht, die bei Überlagerung anderer Strecken eines Netzes das Netz selbst abbildet. Für eine Betrachtung des Gesamtnetzes bedeutet das, dass dies durch Überlagerung der Strecken möglich ist.

Diese Umstände sind auch vor dem Hintergrund hilfreich, dass die Methodik auf ein überschaubares Netz im kommunalen Bereich angewendet werden kann. Dort ist die Anzahl der Bauwerke wesentlich geringer. Generell soll zudem die Geometrie nicht in die Bedeutung eingehen, sondern, wie bei Straßen und Tunnel auch, die Leistung, welche abgewickelt wird.

Im Folgenden soll exemplarisch die Bundesautobahn 7 untersucht werden. Das folgende Diagramm zeigt die Verteilung der Leistungsdaten über die Zählstellen hinweg, sortiert von Süd nach Nord. Der Verlauf kann als Ganglinie der abgewickelten Leistung über die Strecke angesehen werden.

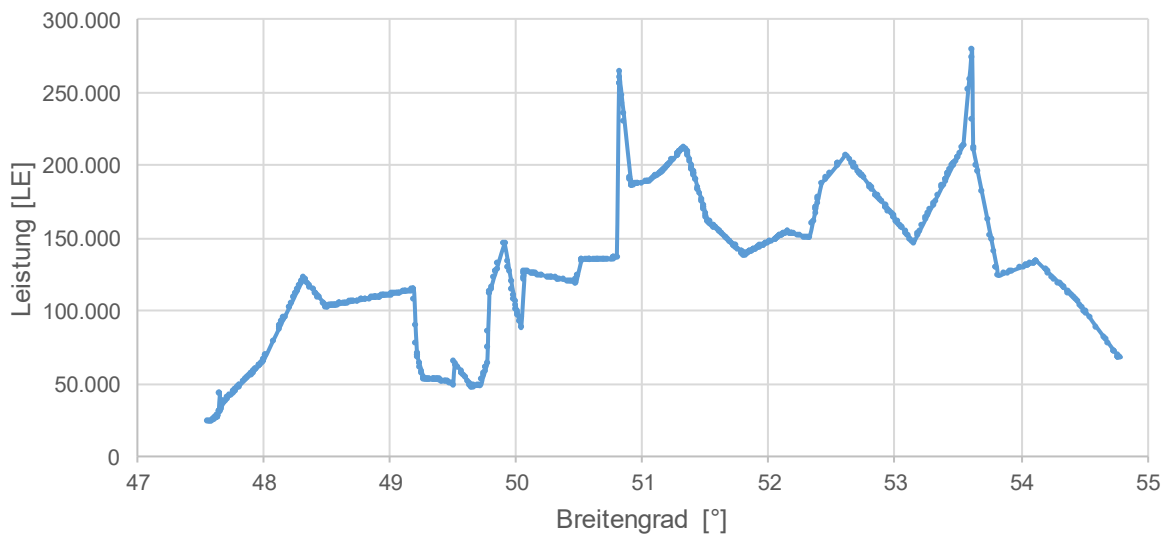


Abbildung 6-23: Ganglinie der Leistung über die Bundesautobahn 7 von Süden nach Norden (via Breitengrad)

Vergleicht man die Ganglinie mit dem Verlauf der Strecke, so lassen sich die Sprünge der Ganglinie interpretieren. So steigen die Werte an, bis sie bei 48,33 wieder fallen. Dies liegt am Abfluss des Verkehrs bei Ulm (A 8). Bei 49,2 kommt es zu einem starken Abfall durch den Abfluss auf die A 6, der sich bei Würzburg durch den Zufluss von der A 3 gegenläufig verhält. Ein besonders starker Sprung in positive Richtung erzeugt die A 5 bei 50,82. Darüber hinaus ist die Hansestadt Hamburg ersichtlich, die vom Hafen aus einen großen Leistungsanteil nach Süden erbringt, der jedoch zu einem großen Teil noch innerhalb der Stadtgrenze auf die anderen Bundesautobahnen verteilt wird.

Die folgende Karte zeigt alle Brückenbauwerke mit einer Länge über 10 m in Abhängigkeit von ihrer Bedeutung hinsichtlich der abgewickelten Leistung. Im Grunde entspricht die farbliche Verteilung der Interpretation der Ganglinie.

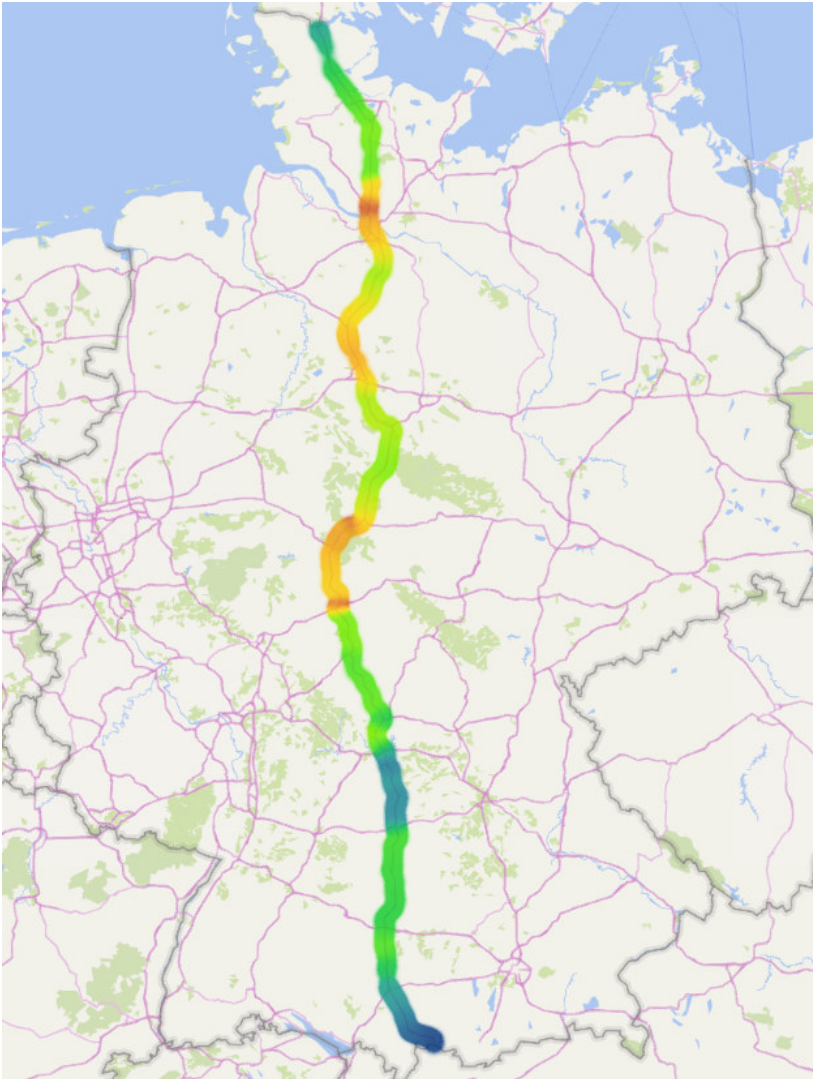


Abbildung 6-24: Heatmap der Brücken (> 10 m) der BAB 7

Die Bauwerke lassen sich nun hierarchisch ableiten. Die folgende Tabelle zeigt die ersten 75 Bauwerke mitsamt Leistung, Bezeichnung und Ort. Die Bezeichnung ist in der Regel spezifisch und schwierig zu interpretieren, dafür stehen jedoch Bauwerks- und Teilbauwerksnummern zur Verfügung sowie die Koordinaten zur eindeutigen Identifizierung.

Kapitel 6 Modellentwicklung und Ableitung eines Instandhaltungsmanagements

Pos.-Nr.	Leistung	Bauwerksname	Ortshinweis
1	276.896	Kollauwanderweg / Brookgraben	Im Zuge A7
2	262.753	UF K 8 und Wahlebach/UF K8 und Wahlebach RiFa Fulda-Hannover	Lohfelden / Ochshausen
3	262.491	Schnackenburgsallee/Überbau Ost	Im Zuge A7
4	261.965	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg Fahrtr. Würzburg - Kassel	Niederaula / Hattenbach
5	261.783	BW 2033 - Brücke ü. einen Forstweg i.Z.d. BAB A 7/Westseite, Rifa Kassel	Behrensen
6	259.951	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg Fahrtr. Hattenbach-Kassel	Neuenstein / Mühlbach
7	257.957	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg Fahrtr. Würzburg - Kassel	Hattenbach
8	250.001	Hafenbahngleise/Überbau Ost	Im Zuge A7
9	245.312	BW 2028 - Brücke ü.d.WL Espolde i.Z.d. BAB A 7/Westseite, Rifa Kassel	Lütgenrode
10	242.154	UF Fußweg/UF Fußweg Fahrtr. Frankfurt - Kassel	Neuenstein / Saasen
11	234.628	UF B 7, KVG u.W.-weg/UF B 7, KVG u.W.-weg, RiFa. Hattenbach - Hannover	Kaufungen / Niederkaufungen
12	232.035	TB Niestetal - UF K3 u. Nieste/UF K3 u. Nieste , RiFa Kassel-Göttingen	Niestetal / Sandershausen
13	231.557	UF Losse/UF Losse RiFa. Hattenbach - Kassel	Kaufungen / Niederkaufungen
14	231.085	Moorburger Hinterdeich/Überbau Ost	Im Zuge A7
15	230.161	UF Anschlußarm zur B 7 Papierfabrik/UF Anschlußarm zur B7 Papierfabrik, FR Hannover	Kaufungen / Kaufungen
16	229.911	UF Wirtschaftsweg, Bunte Berna/UF Wirtschaftsweg, FR Hannover	Niestetal / Heiligenrode
17	229.866	UF WW, Wichtelbrunnenweg/UF WW, RiFa Kassel - Hannover	Niestetal / Sandershausen
18	229.323	UF Diebachsgraben/FR Hannover (Ostseite)	Kassel / Bettenhausen
19	228.788	UF L 3155/UF L 3155 FR Hattenbach-Kassel	Neuenstein / Saasen
20	221.625	UF Geisbach/UF Geisbach Fahrtr. Frankfurt-Kassel	Neuenstein / Aua
21	218.708	Moorburg Schöpfwerk	Im Zuge A7 über Rückhaltebecken
22	217.327	Moorburger Elbdeich/Überbau Ost	Im Zuge A7
23	216.592	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg Hauptbauwerk	Kleba
24	215.904	UF Wirtschaftsweg/UF WW Fahrtr. Hattenbach - Kassel	Neuenstein / Aua
25	214.615	A 7 / K 62 [Kr. SL-FL] (BW 710)/Rifa HH-FL	Jagel
26	212.331	Hochstraße Elbmarsch K20/Überbau Ost, Achse 1-45 (Rifa Nord)	Im Zuge A7
27	211.843	BW 2017, A 7 in km 260,152 über WI. Entw.Graben/Tbw West, Rifa Kassel	Bovenden
28	211.538	Eidelstedt-Unterführung A7/AD HH-NW / Unterführung Rampe 5	Bezirk Eimsbüttel / Eidelstedt
29	210.389	BW 24060 - Uf Aue unter A7, Ab 480, St 3448/BW 24060 Unterführung WL Aue	Abelbeck
30	209.894	A 7 / Gemeindeweg (BW 707)	Brekendorf
31	207.781	BW 197, Brücke ü.e. Wiweg i.Z.d. A 7 km 301,410/Tbw West, Rifa Kassel	Landwehrhagen
32	207.395	BW 2016 - Brücke ü.d. Wirtw.+WI.Dungb i.Z.d. A 7/Tbw West, Rifa Kassel	Bovenden
33	207.044	BW 2026 - Brücke über die Harste im Zuge der A 7/Westseite, Rifa Kassel	Parenzen
34	206.799	BW 2025 - Brücke über die L 555 im Zuge der A 7/Westseite, Rifa Kassel	Parenzen
35	206.000	Holsteiner Chaussee / AD-Nordwest	Im Zuge Holsteiner Chaussee über AD-Nordwest
36	205.627	UF Forstweg/UF Forstweg FR Würzburg - Kassel	Hattenbach
37	205.527	BW 2024 - Brücke ü. einen Wiweg i.Z.d. BAB A 7/Westseite, Rifa Kassel	Parenzen
38	205.496	BW 198, Brücke ü.e. Wiweg i.Z.d. A 7 km 301,782/Tbw West, Rifa Kassel	Landwehrhagen
39	205.207	BW 199, Brücke ü.e. Entwässerungsgraben A 7 km 301/Westseite, Rifa Kassel	Landwehrhagen
40	204.935	A 7 / Gemeindeweg (BW 715)/Rifa HH-FL	Brekendorf
41	204.310	UF Kothener Straße/UF Kothener Straße, von Würzburg nach Kassel	Kalbach / Heubach
42	203.516	BW 03126, Brücke ü.d. L 410 i.Z.d. BAB A7/Tbw West, Rifa Kassel	Ingeln
43	203.029	BW 2015, A 7 in km 261,536 über DB/Tbw West, Rifa Kassel	Bovenden
44	202.214	BW 2022 - Brücke ü. einen Wiweg i.Z.d. BAB A 7/Westseite, Rifa Kassel	Bovenden
45	199.240	UF K 24/UF K 24 Fahrtr. Würzburg - Kassel	Niederaula / Solms
46	199.214	BW 2029 - Brücke ü.d. B 446 i.Z.d. BAB A 7/Westseite, Rifa Kassel	Lütgenrode
47	199.174	BW 2014 - Brücke ü. einen Bach mit Viehtritt A 7/Tbw West, Rifa Kassel	Holtensen
48	198.571	UF Fulda/UF Fulda FR Fulda - Kirchheim (Überbau Ost)	Niederaula / Solms
49	198.383	UF L 3430 und Tal/UF L 3430 und Tal Fahrtr. Würzburg - Kassel	Uttrichshausen
50	198.116	UF Flutmulde/UF Flutmulde Fahrtr. Würzburg - Kassel	Niederaula / Niederjossa
51	198.115	UF K 36/UF K 36 RiFa. Frankfurt - Kassel	Kirchheim / Reckerode
52	198.060	BW 2035 - Brücke ü. einen Wiweg i.Z.d. BAB A 7/Westseite, Rifa Kassel	Großenrode
53	197.104	BW 3179a, A7 über Wi-weg in km 153,850 der A7/	Ahlten
54	196.935	UF L 3159/UF L 3159 RiFa. Frankfurt - Kassel, 1. BA	Kirchheim / Reckerode
55	196.624	A 7 / Gemeindeweg (BW 708)	Jagel
56	196.366	BW 3179b, A7 über Graben in km 151,825 der A7/BW 3179b I, Rifa Hamburg	Ahlten
57	196.296	UF B62 und DB/UF B62 und DB (FR Kassel)	Niederaula / Niederjossa
58	196.051	BW 149, UF Wirtschaftsweg BAB A 7 km 289,001/Unterführung Wirtschaftsweg (Nordseite)	Lippoldshausen
59	195.842	UF Erzebach/UF Erzebach - Hauptbauwerk	Neuenstein / Obergeis
60	195.763	Behringstrasse (Gehw.)/Behringstraße (Gehw.)	Im Zuge Gehweg entlang A7 Behringstraße (A7
61	195.346	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg FR Frankfurt-Kassel	Neuenstein / Aua
62	195.233	UEF Anschlussarm	bei Niederjossa
63	194.878	UF Gemeindestraße, Lanneshofweg	Künzell / Künzell
64	194.818	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg, FR Kassel und Teile FR FFM	Kirchheim / Heddersdorf
65	194.803	UF L 3435/UF L 3435 Fahrtr. Frankfurt - Kassel, 1.BA	Felsberg / Hilgershausen
66	194.652	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg RiFa. Frankfurt - Kassel, 1.BA	Felsberg / Hilgershausen
67	194.501	A 7 / Wennebeksau (BW 512)	Eisendorf
68	194.194	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg Fahrtr. Hattenbach-Kassel	Felsberg / Beuern
69	193.672	UF Gemeindestraße/UF Gemeindestraße Fahrtr. Würzburg - Kassel	Niederjossa
70	193.553	BW 3179, A7 über Wi-weg in km 152,747 der A7/BW 3179 I, Rifa Hamburg	Ahlten
71	193.408	UF Wirtschaftsweg/UF Wirtschaftsweg RiFa. Hattenbach-Kassel	Knüllwald / Oberbeisheim
72	193.282	BW 3178,A7 über DB-Strecke 1750 in km 152,848 d.A7/Rifa Hamburg	Ahlten
73	193.127	Geisterpfad	Im Zuge A7
74	193.061	UF Fußweg bei Ostheim/UF Fußweg RiFa. Frankfurt - Kassel	Malsfeld / Ostheim
75	192.373	3177, A7 über DB Strecke 1730 in km 153,105 d. A7/Rifa Hamburg	Ahlten

Tabelle 6-9: Hierarchische Ordnung der 75 ersten Bauwerke der Teilmenge (BAB 7)

Es lässt sich erkennen, dass benachbarte Bauwerke in der Regel benachbarte Positionen einnehmen, da die Leistungskennwerte sehr nahe beieinanderliegen. Demzufolge sind die Orte kumulativ verteilt. Das erscheint logisch und zeigt, dass sich die leistungstechnische Betrachtung in der Regel nur wenig sprunghaft verteilt. Somit lassen sich unabhängig von den untersuchten Bauwerken regionale Bedeutungen ableiten, die eine Interpretation fördern.

Die Interpolation zwischen den Zählstellen erzeugt ein Bild, welches die punktuelle Betrachtung auf Basis der Zählstellen in eine längenbezogene (basierend auf Koordinaten) transformiert. Diese Transformation findet zwar unter gewissen Abstrichen statt, ermöglicht es jedoch, längenbezogene Aussagen zu treffen.

Die Tabelle 6-9 zeigt mit 75 Bauwerken nur einen Ausschnitt der insgesamt über 700 erfassten Bauwerke der Bundesautobahn 7. Zudem befinden sich viele dieser Bauwerke aus den oben erläuterten Gründen in unmittelbarer Umgebung zueinander. Aus diesem Grund sei im Folgenden eine Auswahl an Brücken gegeben, mit mindestens 500 m Länge. Dabei handelt es sich um 164 erfasste Bauwerke.

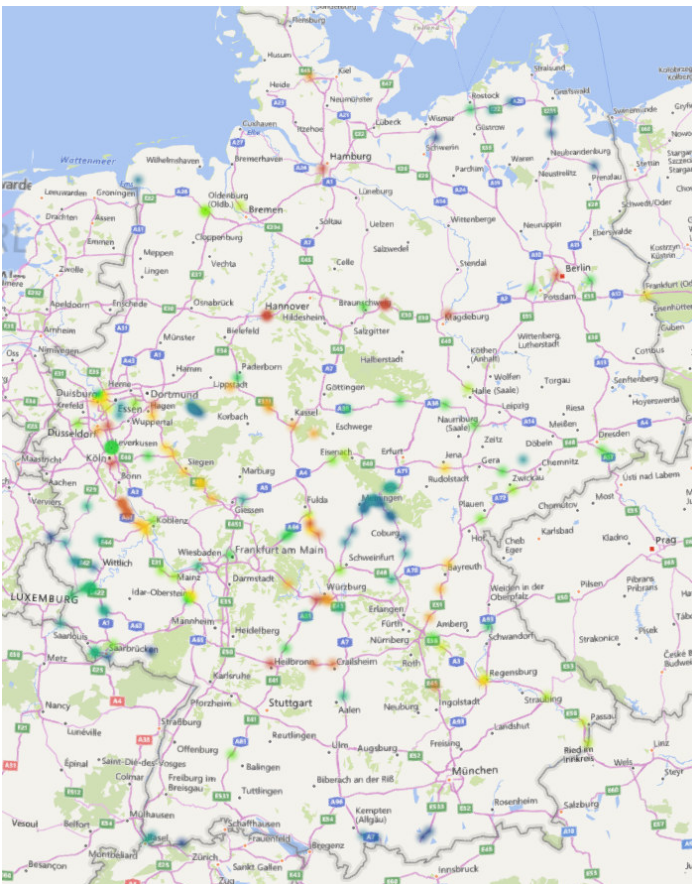


Abbildung 6-25: Darstellung der Brückenbauwerke nach Leistung mit einer Länge ab 500 m

Kapitel 6 Modellentwicklung und Ableitung eines Instandhaltungsmanagements

Rank	Bauwerksname	Ort	Art	Nr.	Leistung
1	Rheinbrücke Rodenkirchen mit LSW/Rheinbrücke Rodenkirchen	Köln-Rodenkirchen	BAB	4	268.653
2	A6 Neckartal, Vorlandbrücke Obereisesheim	Obereisesheim, Heilbronn, Neckarsulm	BAB	6	259.255
3	BW 134 S, A 2 ü. WL Scheppau/Feldwege km 149,385/	Boimstorf	BAB	2	254.280
4	BW 134 N, A 2 ü. WL Scheppau/Feldwege km 149,390/	Boimstorf	BAB	2	254.277
5	BW 642 N, Talbrücke "Arensburg" bei Steinbergen/TBW Nord, Rifa Dortmund	Buchholz	BAB	2	239.671
6	BW 642 S, Talbrücke "Arensburg" bei Steinbergen/Rifa Berlin, südliches TBW	Buchholz	BAB	2	239.667
7	Hochstraße Elbmarsch K20/Überbau Ost, Achse 1-45 (Rifa Nord)	Im Zuge A7	BAB	7	212.331
8	Brücke Ast A3 (6224215F-Z Stat. 1142) über A3/RiFb Heilbronn - Frankfurt	Kist	BAB	3	210.513
9	Neandertalbrücke/Neandertalbrücke Überbau Ost	Erkrath	BAB	3	205.419
10	Elbebrücke Hohenwarthe/Elbeflutbrücke RFB Hannover	Hohenwarthe	BAB	2	200.254
11	UF L 3430 und Tal/UF L 3430 und Tal Fahrtr. Würzburg - Kassel	Ulrichshausen	BAB	7	198.383
12	Rudolf-Wissell-Brücke	Charlottenburg	BAB	100	196.462
13	VINXTBACHTALBR.(A613)/VINXTBACHTALBR.; FR Krefeld	Waldorf	BAB	61	192.290
14	BROHTALBRÜCKE(A619)/Brohtalbrücke Überbau Ost	Niederzissen	BAB	61	192.008
15	AHRTALBR./AHRTALBR.; FR Köln	Bad Neuenahr	BAB	61	190.426
16	A6 KOCHERTALBRÜCKE mit UF L1045 u. K2556/A6, UF L 1045, K 2556 u. Kocher, Kochertalbrücke	Geislingen	BAB	6	189.425
17	TALBR.BENGEN,(A602)/Talbrücke Bengen Überbau Ost	Bengen	BAB	61	188.964
18	A45 / TB Ruhrtal/A45 / TB Ruhrtal; FR Frankfurt	Schwerte	BAB	45	187.126
19	A6, UF der Gronach und 5 Feldwege, GRONACHTAL	Wollmershausen	BAB	6	186.169
20	Brücke A7 über Tal/ Sinntalbrücke/Sinntalbrücke linker Überbau =RFB FD	Riedenberg	BAB	7	183.956
21	Brücke A9 über Kindinger Hang	Ilbling	BAB	9	183.860
22	Brücke über Tal / Talbrücke Heidingsfeld	Würzburg-Heidingsfeld	BAB	3	177.892
23	A 7 / NOK (Hochbrücke "Rader Insel") (BW 603)/	Rendsburg	BAB	7	172.466
24	TB Twistetal und L552/TB Twistetal RiFa. Kassel - Dortmund	Stadt Warburg / Welda	BAB	44	166.977
25	Talbrücke Schnaittach/Überbau FR Berlin (Bergfahrt)	Schnaittach	BAB	9	166.803
26	TB Breuna - UF L3080 u. K91/TB Breuna; Überbau Süd RiFa. Dortmund - Kassel	Breuna / Breuna, Rhöda	BAB	44	166.663
27	TB Wehretal/Wehretalbrücke RF Herleshausen - Kassel	Walburg	BAB	44	166.576
28	TB Bergshausen/TB Bergshausen RiFa. Kassel - Dortmund	Bergshausen	BAB	44	166.576
29	Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe/Irh. Vorlandbrücke	Düsseldorf	BAB	46	165.612
30	Brücke A3 über Tal /Haseltalbrücke/FR Frankfurt	Bischbrunn	BAB	3	163.271
31	A44 / TB Alme + K16 + DB(1)/A44 / TB Alme, FR Dortmund	Ahden	BAB	44	163.031
32	Brücke A3 über Tal /Mainbrücke Randersacker/Fahrtrichtung Frankfurt / NEUBAU 2008	Randersacker	BAB	3	162.851
33	A40/Rheinbrücke Duisburg-Neuenkamp/Rheinbrücke Duisburg-Neuenkamp	Duisburg-Neuenkamp	BAB	40	162.159
34	Brücke A9 über Tal bei Trockau/Überbau FR Berlin	Trockau	BAB	9	161.101
35	NETTETALBRÜCKE(A642)/NETTETALBRÜCKE; FR Köln	Plaidt	BAB	61	158.374
36	UF Ast A45+L3052+WW -Lemptalbrücke/Überbau links, -Nord-, RiFa Dortmund	Ehringshausen	BAB	45	158.283
37	A 42/Max-Eyth-Str./Überbau FR Kamp-Lintfort	Oberhausen	BAB	42	156.893
38	LÜTZELBACHTALBRÜCKE(A650)/LÜTZELBACHTALBRÜCKE, FR Köln	Bassenheim	BAB	61	154.545
39	Brücke A3 über die Donau bei Sinzing (AS)(48)/Überbau FR Nürnberg (48)	Sinzing	BAB	3	152.448
40	A45 / Siegtalbrücke/A45 / Siegtalbrücke, FR Frankfurt	Siegen	BAB	45	151.968
41	Brücke A9 über Tal - Talbrücke Lanzendorf/FR Berlin	Lanzendorf	BAB	9	151.865
42	UF DB+DIII+B 277-Talbrücke Sechshelden-/Überbau RiFa Dortmund	Sechshelden	BAB	45	149.489
43	A45/ TB Brunsbecke	Hagen	BAB	45	149.362
44	A45 / TB Saßmicke/A45 / TB Saßmicke, FR Frankfurt	Olpe	BAB	45	148.789
45	TB Haiger, UF L 3044, K 43, DB u. DIII/ÜBB Nord, RiFa Dortmund	Haiger	BAB	45	148.760
46	A45 / TB Bleche/A45 / TB Bleche, FR Frankfurt	Bleche	BAB	45	145.617
47	SAALETALBRÜCKE BEI JENA-GÖSCHWITZ/RF ESA-DD	BEI JENA-GÖSCHWITZ	BAB	4	144.427
48	Brücke A7 über Tal /Grenzwaldbücke	Speicherz	BAB	7	144.118
49	Talbrücke Alzey/Teilbauwerk 1; FR Nord	Alzey	BAB	61	143.381
50	Überflieger AK Alzey MZ-LU (A63-A61)/Überflieger Albig (Überführung A63-A61)	Albig	BAB	61	142.861
51	MOSELTALBRÜCKE WINNINGEN	Dieblich	BAB	61	141.325
52	A40 / Raffelbergbrücke/A40 / Raffelbergbrücke, nördl. Überbau, FR Venlo	Duisburg-Kaiserberg	BAB	40	139.606
53	Oderbrücke/Überbau 1, linke Richtungsfahrbahn	FRANKFURT/ODER	BAB	12	138.273
54	Ruhrtalbrücke Mintard	Mülheim an der Ruhr	BAB	52	129.682
55	Brücke A3 über Tal bei Pilsach	Pilsach	BAB	3	124.439
56	Brücke A3 über die Donau bei Schalding (194)	Schalding	BAB	3	123.280
57	Brücke A93 über die Donau bei Pfaffenstein (23)/Überbau FR Hollededau (23)	Regensburg	BAB	93	121.213
58	Brücke A3 über den Inn bei Suben (235)/Überbau FR Passau (235)	Pocking	BAB	3	120.544
59	UF L 3307 und Fulda, Talbrücke Welkers	Eichenzell / Welkers	BAB	7	119.861
60	A 27 / Brückenstrang Ihlpohl/Brückenstrang Ihlpohl FaRi Walsrode	Ihlpohl	BAB	27	119.716
61	Brücke A3 über die Donau bei Metten (140)	Metten	BAB	3	119.271
62	WERRATALBRÜCKE BEI HÖRSCHTEL	BEI HÖRSCHTEL	BAB	4	117.534
63	Götschetalbrücke und über DB-AG/RFB Halle	Dachritz	BAB	14	115.528
64	NAHEBRÜCKE DIETERSHEIM(A504)/NAHEBR.DIETERSHEIM; FR KO	Dietersheim	BAB	61	112.052
65	O155 / A28 - Richtungsfahrbahn Leer, km 80,854/Rifa Leer	Oldenburg-Eversten	BAB	28	109.246
66	A72-S BW54, Muldebrücke Wilkau-Haßlau/Richtungsfahrbahn Chemnitz-Hof	Wilkau - Haßlau	BAB	72	109.134
67	RHEINBR.BENDORF(A276)/RHEINBR.BENDORF - Seite Bendorf	Bendorf	BAB	48	108.144
68	O153 / A28 - Bauteil 1 (Rifa Leer), km 82,940/Rifa Leer	Oldenburg-Osternburg	BAB	28	108.136
69	PFÄDCHENSGRABENBR.(A526)/PFÄDCHENSGRABENBR.	Daxweiler	BAB	61	107.283
70	A43 / RUHR, Fuss-u.Radweg/A43 / RUHR, Fuss-u.Radweg, FR Wuppertal	Witten	BAB	43	105.945
71	Brücke A70 über Tal /Wembrücke/Brücke A70 über Tal /Wembrücke /RF A7	Schnackenerwerth	BAB	70	105.895
72	Trabrennbahn	Mönchengladbach-Neersbroich	BAB	44	104.693
73	TB Wehretal (ehem.TB Richelsdorf)/UF L1022a FR Obersuhl - Kirchheim	bei Untersuhl	BAB	4	103.610
74	A72-S BW104, Elsterbrücke Pirk/Überbau Richtungsfahrbahn Chemnitz-Hof	Pirk	BAB	72	101.395
75	Sulzbachtalbrücke/RF Luxemburg	FRIEDRICHSTHAL	BAB	8	99.980

Tabelle 6-10: Ausschnitt der Hierarchie der Brückenbauwerke ab 500 m (1–75)

Die insgesamt über 11.000 erfassten Brückenbauwerke können im Rahmen ihrer erfassten Daten beliebig gefiltert werden. Zwei Möglichkeiten wurden aufgezeigt. Die tatsächlich sinnvollste Art ist situationsabhängig und vor allem darauf abzustellen, welche Aussagen getätigt werden soll.

6.1.6.2.3 Bedeutung der Ingenieurbauwerke für längenbezogene Leistungsbestimmung

Aufgrund der hohen Anzahl an Brückenbauwerken kann das Verkehrsnetz geographisch relativ gut beschrieben werden. Jede Brücke, ebenso wie jeder Tunnel oder jeder Messpunkt kann mittels x- und y-Koordinate eindeutig beschrieben werden. Diese Koordinaten werden durch die Angabe von Längen- und Breitengrad beschrieben.

Längencharakteristische Geometrien, zu denen die untersuchten Straßen gehören, können als Menge solcher Punkte beschrieben werden. Dazu müssen lediglich jene gefiltert werden, die der untersuchten Strecke angehören und entsprechend dieser geordnet werden. Bauwerke, die sich innerhalb eines durch Messpunkte gebildeten Intervalls befinden, können anschließend Informationen der Messpunkte zugeordnet werden. Je nach Qualität der Messpunkte kann das unter anderem mittels Interpolation oder Simulation geschehen.

Da nun jeder vorhandenen Koordinate die notwendigen Informationen zugeordnet wurden, kann die Punktmenge der punktbezogenen Hierarchie um ein Vielfaches erhöht werden. Aufgrund der enormen Dichte der Punkte kann nun eine längenbezogene Ordnung abgeleitet werden.

Für die weiteren Untersuchungen bzgl. der Ausfallbedeutung ermöglicht dieser Sachverhalt, dass jeder beliebige Punkt berücksichtigbar ist. Dementsprechend kann auch jeder beliebige Punkt der Punktmenge *Infrastruktur* nicht nur praktisch ausfallen, sondern auch entsprechend untersucht werden.

In der folgenden Abbildung ist eine Übersicht über die Autobahnen und deren Leistungsabwicklung gegeben. Es fehlen lediglich einige besonders kurze Abschnitte, die keine Zählstellen aufweisen. Dabei handelt es sich um wenige (< 20) untergeordnete Strecken mit dreistelligen Bezeichnungen.



Abbildung 6-26: Darstellung längenbezogener Betrachtung

6.2 Vernetzung von Funktionseinheiten als einzelwirtschaftlicher Aspekt

Im Folgenden sollen nun die petalen und fugalen Einflüsse mit der dargestellten Methodik aus Kapitel 5.2 auf Basis der hergeleiteten Funktionseinheiten ermittelt und anschließend verknüpft werden. Dadurch soll die Hierarchie der Bedeutung erzeugt werden. Berücksichtigt wird der Verkehrsträger Straße mit den typischen Ingenieurbauwerken Brücke und Tunnel.

6.2.1 Straße

Bei der Betrachtung einer Straße werden alle anderen möglichen Tangierungselemente außer Acht gelassen. Das bedeutet, es wird eine Straße in Form der freien Strecke untersucht. Ingenieurbauwerke werden an entsprechender Stelle separat betrachtet. Als Gedankenbeispiel kann eine Außerortsstraße (umgangssprachlich Landstraße) dienen, die auf einem Erdkörper errichtet wurde. Es kann sich jedoch auch auf beliebige andere Straßen bezogen werden (z.B. Autobahnen). Wichtig ist lediglich die Tatsache, dass es sich um eine offene Strecke handelt, da

sie sich auf die räumliche Ausbreitung der Straße auswirkt. Abstände sind weiter gefasst, sodass sich Funktionseinheiten nicht tangieren, im Gegensatz bspw. zu Brücken, wo eine Berührung möglich bzw. sogar technisch notwendig ist.

6.2.1.1 Bewertung der Einflüsse der Funktionseinheiten

Petaler Bereich

Bei der Bestimmung der petalen Einflüsse lassen sich einige Funktionseinheiten identifizieren, die sowohl starken Einfluss ausüben, als auch starken Einfluss erfahren. In erster Linie zählt die Tragschicht zu diesem Bereich. Da der Straßenkörper, bestehend aus *Unterbau*, *Trag-* und *Deckschicht*, von praktisch monolithischer Natur ist, gilt dies auch für *Unterbau* und *Deckschicht*, wenngleich nicht in diesem hohen Maße.

Andere Funktionseinheiten wie *Fahrzeug-Rückhaltesysteme* und *Leiteinrichtungen*, *Verkehrsschilder* und *Fahrbahnmarkierungen* weisen dagegen deutlich geringere Aktivität und Passivität auf. Zwar sind sie fugal von höherer Bedeutung, für das Bauwerk Straße sind sie dagegen von geringer Relevanz.

Noch deutlicher gilt das für *Zäune*, *Geländer* und *Straßenbeleuchtungsanlagen*. Deren Einfluss ist sehr gering. Das geschieht vor allem dann, wenn ihre Installation den Straßenkörper nicht (*Zäune*) oder nur peripher (Leitungen elektrischer Einrichtungen) tangiert.

Fugaler Bereich

Betrachtet man die Funktionseinheiten der Straße in Bezug auf den Funktionsbetrieb, so lassen sich verschieden starke Ausprägungen hinsichtlich des Einflusses erkennen. Der *Unterbau* gibt schwere Schäden in mindestens direkter Form an die *Tragschicht* weiter und diese an die *Deckschicht*. Schäden können daher zur unmittelbaren Sperrung einer Straße führen. Die *Tragschicht* dagegen wird ihre eigenen Schäden entsprechend an die *Deckschicht* weitergeben, die dann lokal eingegrenzter sind als die des *Unterbaus*. Schäden an der *Deckschicht* selbst wiederum sind lokal am stärksten einzugrenzen. Die Wahrscheinlichkeit solcher Schäden wie auch ihre Entdeckungswahrscheinlichkeit steigt von unten nach oben (vom *Unterbau* zur *Deckschicht*) an. Für den Einfluss vor dem Hintergrund der Vernetzungsanalyse spielt das jedoch keine Rolle.

Einen relativ großen Einfluss haben *Fahrzeug-Rückhaltesysteme* und *Leiteinrichtungen*. Beeinträchtigungen in größerem Maße an dieser Einheit führen zumindest zu Teilspernungen. Im Bereich der Bundesautobahnen sind diese Einrichtungen Standard, im Bereich der untergeordneten Straßen sind sie in begründeten Bereichen vorgesehen. Diese Begründung begründet zugleich ihren Einfluss.

Geringeren, aber spürbaren Einfluss haben unter anderem die *Entwässerung* und die *Fahrbahnmarkierungen*. Schäden in diesem Bereich führen zur Herabsetzung der möglichen Höchstgeschwindigkeit, bspw. bei Nässe (Aquaplaning) oder für bestimmte Fahrbahnbereiche bei fehlender/mangelhafter Markierung (Zusatz VZ 2113).

Vernachlässigbaren Einfluss haben dagegen bspw. *Straßenbeleuchtungen* auf Autobahnen, da diese optional sind oder *Landschaftsbauarbeiten*, da diese lediglich petale Einflüsse aufweisen. Auch Schäden an *Lärmschutzkonstruktionen* haben keinen direkten Einfluss, wenngleich eine Behebung für die Funktionsfähigkeit notwendig ist.

6.2.1.2 Ableitung der Hierarchie bewerteter Funktionseinheiten

Im Folgenden soll nun mithilfe des bereits beschriebenen Verfahrens eine Hierarchie für die Funktionseinheiten der Straßeninfrastruktur abgeleitet werden. Dazu wird der fugale sowie der petale Einfluss bestimmt und anschließend verknüpft. Auf Basis der Aktivität des Resultates wird dann der hierarchische Zusammenhang bestimmt.

Der fugale Einfluss entspricht den Einflüssen der Funktionseinheiten auf den Funktionsbetrieb. Dementsprechend stellt sich die Verteilung gemäß der Bewertung aus dem entsprechenden Abschnitt 6.2.1.1 dar. Der normierte Einfluss ist im Folgenden dargestellt:

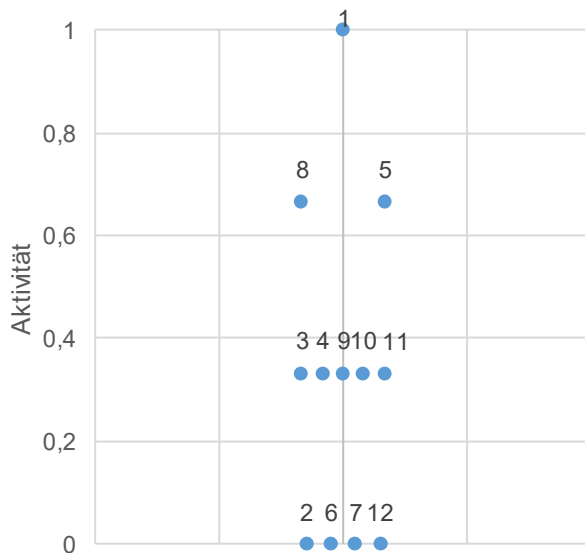


Abbildung 6-27: Fugaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert)

Die hohe Bedeutung des Unterbaus für den Funktionsbetrieb ist deutlich zu erkennen, ebenso wie die Tatsache, dass es sich dabei um die einzige Funktionseinheit in diesem Bereich handelt. Trag- und Deckschicht haben geringeren Einfluss, da sich Schäden nur auf lokale Bereiche begrenzen. Auch der fehlende Einfluss von Landschaftsbauarbeiten, Lärmschutz und Straßenbeleuchtung wird deutlich.

Der petale Einfluss ist, aufgrund der berücksichtigten Wechselwirkung der Funktionseinheiten unter sich, nicht ohne Weiteres prognostizierbar. Im Rahmen der Wechselwirkungsanalyse lässt sich die folgende Verteilung bestimmen.

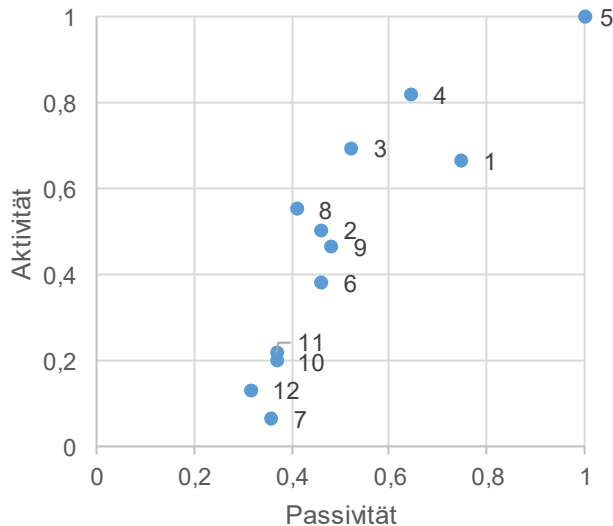


Abbildung 6-28: Petaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal

Innerhalb der Wechselwirkung dominiert die Tragschicht mit aktivem und passivem Maximalwert. Sie wirkt demzufolge in beide Richtungen sehr stark. Dies liegt darin begründet, dass sie für die Deckschicht auf der gesamten Fläche eine fundamentale Eigenschaft besitzt. Gleichzeitig werden Leitungen, Rückhaltesysteme und Verkehrsschilder in sie eingebracht. Auch die Entwässerung, wenn vorhanden, schneidet die Tragschicht zumindest teilweise. Deutlich geringere Aktivität weisen Funktionseinheiten auf, die alleine stehen (funktional wie auch geometrisch). Das trifft bspw. auf Zäune zu, aber auch auf Fahrbahnmarkierungen, die auf ihren Berührungspunkt (hier die Deckschicht) keinen wesentlichen Einfluss ausüben können. Auffällig ist zudem, dass die Varianz in der Passivität gering ausfällt, je geringer die Aktivität ist. Erst mit zunehmender Aktivität jenseits der 0,6 steigt die Passivität an. Zumindest optisch lässt sich der Eindruck gewinnen, dass hier ein Zusammenhang besteht, etwa durch ein Polynom zweiten Grades andeutbar.

Im nächsten Schritt werden die Einflüsse verknüpft. Hier sorgen die hohen fugalen Einflüsse nun gegenüber den schwächeren für Stabilität und Dominanz im Vergleich zu den petalen Einflüssen. Dieses Verhalten wirkt wie beabsichtigt umso stärker, je weiter die beiden Einflussbereiche auseinanderliegen.

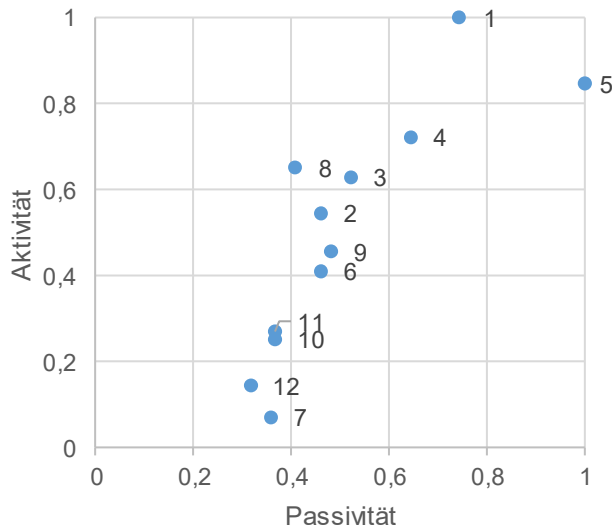


Abbildung 6-29: Verknüpfter Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal

Der Unterbau löst die Tragschicht in der Aktivität der Funktionseinheiten ab, die Passivität der Tragschicht dominiert aber weiterhin. Die Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen gewinnen im Rahmen der Verknüpfung ebenfalls an Aktivität. Die restlichen Funktionseinheiten bewegen sich dagegen nur geringfügig, petaler und fugaler Einfluss sind hier vergleichsweise nahe beieinander.

Basierend auf der Aktivität der Funktionseinheiten lässt sich die folgende Hierarchie ableiten. Die Bedeutung nimmt nach rechts zu. Das Bedeutungsmaß ist zudem in der zweiten Abbildung quantifiziert und entspricht qualitativ den Abständen aus der oberen Abbildung 6-30.

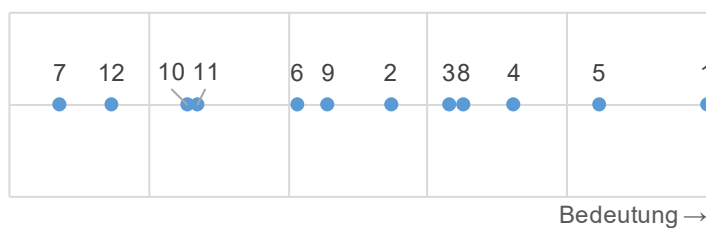


Abbildung 6-30: Hierarchische Darstellung der Funktionseinheiten (steigend von links nach rechts)

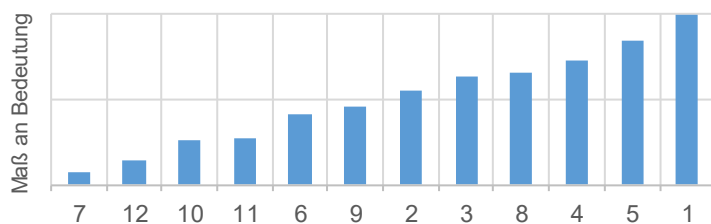


Abbildung 6-31: Verhältnismäßiger Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten

Von größter Bedeutung ist demnach der Unterbau, mit deutlichem Abstand vor der Tragschicht und der Deckschicht. Damit ist die Fahrbahn insgesamt von großer Bedeutung, vor dem Hintergrund des Funktionsbetriebes erscheint das plausibel. Es folgen die Verkehrssicherheit betreffende Funktionseinheiten wie die Fahrzeug-Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen sowie die Entwässerung, aber auch die Landschaftsbauarbeiten im Bereich der Bankette, Böschung und des Mittelstreifens. Als verhältnismäßig unbedeutend stellt sich die Fahrbahnmarkierung heraus. Das ist insofern plausibel, als sie gegenüber der Verkehrsbeschilderung als redundant anzusehen ist. Eine Redundanz, die bspw. bei Schneefall außerhalb von Baustellen temporär notwendig sein kann. Spurwechsel bspw. werden sowohl durch die Markierungen, als auch durch Beschilderung ausgedrückt. Die Richtungshaltung wird zwar durch die Markierung erleichtert, ist aber ebenso nicht notwendig, wenngleich auf der Autobahn obligatorisch.

6.2.2 Brücke

Bei der Betrachtung einer Brücke wird die Straße um ein Ingenieurbauwerk erweitert. Gleichzeitig ändert sich jedoch auch die Straße selbst, da der Aufbau oberhalb einer Brücke nicht dem der freien Strecke entspricht. Es handelt sich um einen Zwangspunkt der freien Strecke.

Die Brücke selbst kann als für die Betrachtung konform zur DIN 1076 verstanden werden, was bedeutet, dass sie als Überführungsbauwerk verstanden wird, und eine lichte Weite zwischen den Widerlagern von mindestens 2 Metern besitzt.

6.2.2.1 Bewertung der Einflüsse der Funktionseinheiten

Petaler Bereich

Im petalen Bereich lassen sich einige Funktionseinheiten identifizieren, die einem starken Einfluss unterliegen bzw. starken Einfluss ausüben. Dazu gehört bspw. der horizontale *Überbau*, das klassische Tragwerk. Durch seine zentrale Rolle tangiert und beeinflusst es eine Vielzahl anderer Funktionseinheiten und wird gleichzeitig umgekehrt von einer Vielzahl tangiert und beeinflusst. Hohe Bedeutung kommt auch der *Fahrbahn* zu. Nicht nur als Grundlage für den Funktionsbetrieb, welcher zum fugalen Bereich gehört. Aufgrund der Lage dient die *Fahrbahn* als schützende Funktionseinheit für eine hohe Zahl an Funktionseinheiten. Das gleiche gilt für die horizontale *Entwässerung*. Viele Versorgungsleitungen, aber auch das Tragwerk selbst müssen vor Wasser geschützt werden, was primär durch die beiden genannten Funktionseinheiten geschieht. Von hohem Einfluss sind zudem die *Kappen*. Sie bilden die Grundlage für *Geländer*, *Schutzeinrichtungen*, *Lärmschutzwände* und *Begehungswege*. Ein Wegfall der Kappen würde eine große Zahl von Funktionseinheiten somit negativ beeinflussen.

Von sehr geringem Einfluss im System Brücke sind dagegen Funktionseinheiten wie *Landschaftsbauarbeiten*, die im Prinzip abseits des Bauwerks stattfinden. Sie haben für den Funktionsbetrieb und das Bauwerk selbst eine untergeordnete Rolle, wenngleich sie notwendig

sind, damit die Erreichbarkeit und damit die Durchführung von Maßnahmen an anderen Funktionseinheiten gewährleistet ist. Auch der *Vogeleinflugschutz* weist eine geringe Vernetzung auf. Er tangiert im Allgemeinen nur wenige Funktionseinheiten und soll Nischen und Zwischenräume von Vögeln freihalten. Dies hat Einfluss auf den Schutz von Betonbauteilen im Tragwerksbereich.

Fugaler Bereich

Von hoher fugaler Bedeutung ist per definitionem das *Brückengeländer*. Fehlt es, kann die Verkehrssicherheit so massiv gestört sein, dass ein ordnungsgemäßer Funktionsbetrieb nicht mehr zulässig ist. Ähnlich der Straße an sich, spielt auch bei der Überführung über eine Brücke die Verkehrssicherheit eine wichtige Rolle. *Rückhaltesysteme und Leiteinrichtungen* sind daher von erhöhtem Einfluss. Für das Bauwerk selbst ist die Tragstruktur von großem Einfluss, da Einschränkungen hier die Verwendbarkeit der Brücke infrage stellen können. Dies gilt zudem auch für die direkt am Funktionsbetrieb beteiligten Funktionseinheiten wie *Fahrbahn, Kappen* und *Übergänge*.

Von geringem bis vernachlässigbarem Einfluss sind solche Funktionseinheiten, die den Funktionsbetrieb nicht tangieren oder optionale Komponenten. Dazu gehören auch hier *Landschaftsbauarbeiten* und der *Vogeleinflugschutz*, aber auch *Lärmschutzkonstruktionen* oder die, wie bereits im Beispiel der Straße optionale, *Beleuchtung*.

6.2.2.2 Ableitung der Hierarchie bewerteter Funktionseinheiten

Analog zum Vorgehen bei der Bewertung der Straßen sollen im Folgenden die Brückenobjekte mit den vorgestellten Verfahren untersucht und bewertet werden. Dazu werden die petalen und fugalen Einflüsse bestimmt und anschließend verknüpft. Auf dem Ergebnis der Verknüpfung wird anschließend der hierarchische Zusammenhang der Funktionseinheiten untereinander abgeleitet.

Der fugale Einfluss ist die Interpretation der Einflüsse auf den Funktionsbetrieb. Dementsprechend kann der fugale Einfluss für jede Funktionseinheit eines von vier Niveaus annehmen. Die folgende Abbildung zeigt die Verteilung.

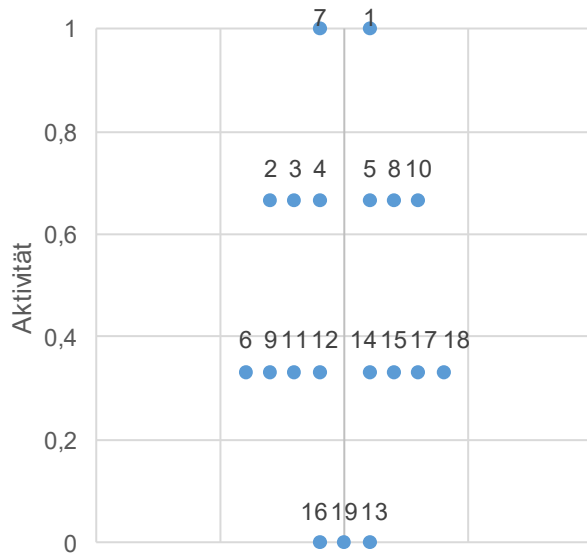


Abbildung 6-32: Fugaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert)

Der große Einfluss durch die Gründung sowie das Gelände sind deutlich zu erkennen, gefolgt vom Tragwerk in horizontaler und vertikaler Ausrichtung. Ebenso weisen Lager, Kappen und Übergänge hohe Werte auf. Weniger sicherheitsrelevante Funktionseinheiten im Bereich des Ausbaus weisen dagegen untergeordnete Niveaus auf.

Mittels Bestimmung der Einflüsse untereinander und anschließender Analyse der Wechselwirkungen lassen sich die petalen Einflüsse ermitteln. Dadurch lässt sich folgende Verteilung der Funktionseinheiten ableiten.

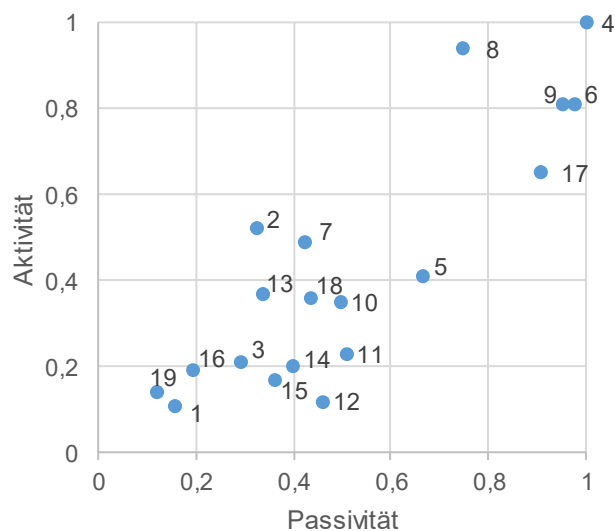


Abbildung 6-33: Petaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal

Es lassen sich in der Abbildung zwei Bereiche erkennen, in denen die Funktionseinheiten verteilt sind. Von hoher Aktivität und Passivität ist das horizontale Tragwerk, mitsamt der Fahrbahn, der

Kappen, der Übergänge sowie der Entwässerung. Diese Funktionseinheiten können als Teilkonstrukt verstanden werden, in dem sich der, vom speziellen Funktionsbetrieb (Straßenbetrieb) unabhängige, für den allgemeinen Funktionsbetrieb (Querungsbetrieb) jedoch notwendige Teil der Brücke, als horizontales Querungsbauwerk darstellen lässt.

Die zweite Gruppe der Funktionseinheiten umfasst die verbliebenen Einheiten. Dominant in dieser Untergruppe sind die Lagerung und aktiv sicherheitsrelevante Einrichtungen, gefolgt von der Konstruktion in vertikale Richtung. Wesentlich passiver verhalten sich dagegen die sicherheitsrelevanten Funktionseinheiten (Lichtsignale, Verkehrsschilder) und Landschaftsbauarbeiten.

Unter Berücksichtigung der fugalen Einflüsse verändert sich die Verteilung auf Basis der petalen Einflüsse. Sicherheitsrelevante und statisch wichtige Funktionseinheiten erfahren eine Stabilisierung gegenüber der durch die petalen Einflüsse induzierten Verschiebungen. Dadurch ergibt sich das folgende Bild:

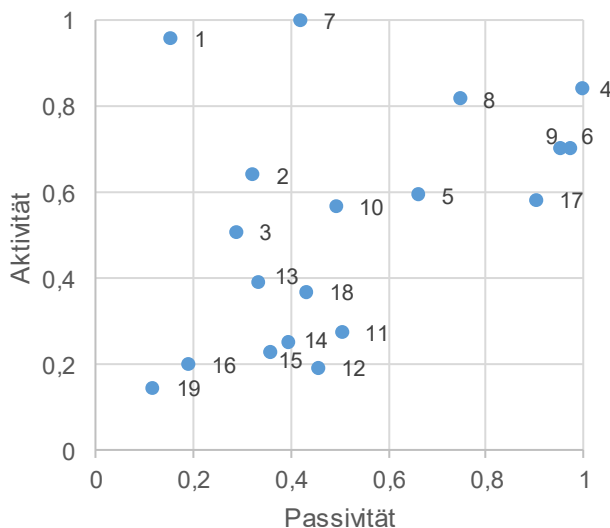


Abbildung 6-34: Verknüpfter Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal

Die Gründung gewinnt stark an Bedeutung, insgesamt vor allem die statisch wichtigen Funktionseinheiten. Ebenso das rechtlich bedeutende Gelände. Auf den größten Teil der Funktionseinheiten hat die Verknüpfung jedoch nur einen sehr geringen bis gar keinen Einfluss.

Basierend auf der resultierenden Aktivität der Funktionseinheiten lässt sich nun die folgende Hierarchie ableiten. Dabei nimmt die Bedeutung von links nach rechts zu. Die zweite Abbildung stellt das Bedeutungsmaß quantifiziert dar.

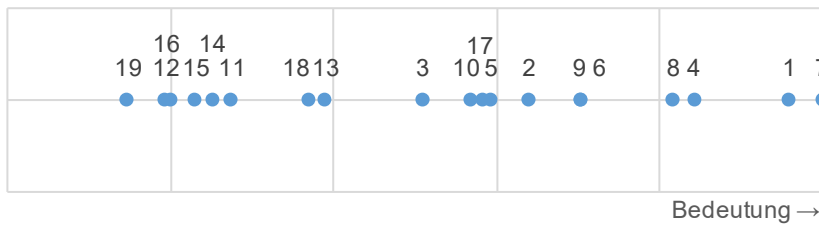


Abbildung 6-35: Hierarchische Darstellung der Funktionseinheiten (steigend von links nach rechts)

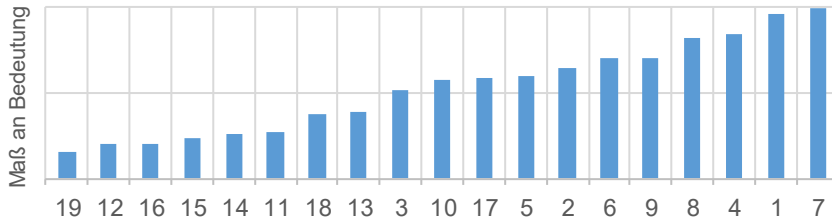


Abbildung 6-36: Verhältnismäßiger Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten

Wie sich bereits im Prozess der Herleitung der Hierarchie abgezeichnet hat, ist das Geländer der Brücke, aus externen rechtlichen Gründen, am bedeutsamsten. Es folgt die Gründung der Brücke mit ihrem hohen statischen Einfluss auf das Bauwerk, ebenso wie der horizontale Überbau. Der horizontale Ausbau aus Fahrbahn, Kappen, Lagerung und Übergängen ergänzt die Bedeutung, gefolgt von der Entwässerung. Der straßenverkehrsspezifische Ausbau, dem keine sicherheitsrelevanten Eigenschaften innewohnen, weist dagegen das geringste Bedeutungsmaß auf. Dies gilt bspw. für Fahrbahnmarkierungen, Verkehrsschilder, Lichtsignalanlagen und Straßenbeleuchtung.

6.2.3 Tunnel

Das Ingenieurbauwerk Tunnel lässt sich analog zur Brücke in Konformität mit der DIN 1076 definieren. So sollen Bauwerke als Tunnel verstanden werden, die unterhalb der Erd- bzw. Wasseroberfläche liegen. Einhausungen gelten ab 80 m Länge als Tunnel.

Ebenfalls analog zur Brücke stellt der Tunnel einen Zwangspunkt der freien Strecke dar. Der Straßenzug wird um das Bauwerk erweitert, zudem ändert sich auch die Straße selbst, ihr Aufbau kann durch den Tunnel nicht ohne Einschränkung fortgeführt werden.

6.2.3.1 Bewertung der Einflüsse der Funktionseinheiten

Petaler Bereich

Innerhalb von Tunnelbauwerken lassen sich teils stark beeinflussende bzw. beeinflusste Funktionseinheiten erkennen. So ist bspw. die Bedeutung der *Innenschale* sowie der Wände für eine Vielzahl von Funktionseinheiten sehr hoch, da letztere in diesen befestigt werden. Ist ihr

Zustand unzureichend, so muss davon ausgegangen werden, dass die installierten Einheiten trotz einwandfreier Funktion ausfallen. Diese Bedeutung ist in beide Richtungen von Belang, da auf der anderen Seite die Installationen bei unzureichender Ausführung Wände und Innenschale beschädigen können. Ebenfalls hohe Bedeutung kommt dem *Brandschutz* zu. Gerade in Tunnelbauwerken, in denen Brände verheerende Folgen haben können, schützen diese große Teile des Bauwerks. Da sich dieser schützende Charakter auf zahlreiche Funktionseinheiten auswirkt, führt das zu hohen Bedeutungen für den Brandschutz selbst. Ebenfalls hohe Bedeutung erfährt die *Auffüllung* mitsamt *Fahrbahn*. Beide Funktionseinheiten beherbergen bzw. schützen zahlreiche weitere Funktionseinheiten, da viele Leitungen, zum Teil auch brandschutzrelevante, in bzw. unter ihnen verlegt sind.

Deutlich geringere Bedeutung geht von Funktionseinheiten aus, deren Bedeutung bspw. redundant oder optional ist. Die *Kommunikationsanlagen* sind nicht zwingend notwendig, auch nicht aus brandschutztechnischen Gründen. Ebenso wie die *Videoüberwachung*. Diese ist in entsprechend großen Tunnel zwar obligatorisch, Zwischenfälle im Inneren des Tunnels würden aber auch ohne sie nach außen getragen. Ebenfalls unbedeutend ist die *Fahrbahnmarkierung*. Diese wirkt fast ausschließlich fugal, auf den Funktionsbetrieb.

Fugaler Bereich

Im fugalen Bereich bestehen in Tunnelbauwerken, anders als bei Straßen und noch stärker als bei Brücken, teilweise hohe Bedeutungen aus Sicht rechtlicher Vorgaben. Insbesondere dem Brandschutz in Tunnelbauwerken kommt eine hohe Bedeutung zu, somit den Funktionseinheiten wie dem *baulichen Brandschutz*, den *Schutz- und Rettungstüren*, den *Brandmeldeanlagen* und den *Löscheinrichtungen*. Darüber hinaus kommt der Überwachung wenigstens eine mittelhohe Bedeutung zu. Da im Tunnel aus verschiedenen Ereignissen deutlich schwerwiegende weitere Zwischenfälle entstehen können, sind die Funktionseinheiten *Kommunikation und Videoüberwachung* vergleichsweise bedeutsam. Hier zeigt sich bereits die Bedeutung der technischen Ausstattungen innerhalb von Tunnelbauwerken. Sowohl im Umfang als auch in der Bedeutung hebt sie sich deutlich von der restlichen Straßenverkehrsinfrastruktur ab.

Darüber hinaus geht auch hohe Bedeutung vom „Tunnelrohbau“ aus. Die Funktionseinheiten, welche den Tunnel in seiner geometrischen und statischen Form bilden. Das trifft insbesondere auf die *Außenschale* zu, aber auch auf *Dichtungen* und *Innenschale*. Für den Träger des Funktionsbetriebes, die *Fahrbahn*, ist ebenfalls eine gewisse Bedeutung zu berücksichtigen, ebenso wie für die *Auffüllung* und die *Kappen* bzw. *Gehwege*, welche die Standsicherheit der Fahrbahn begründen.

6.2.3.2 Ableitung der Hierarchie bewerteter Funktionseinheiten

Die Bewertung der Einflüsse und die Ableitung der Hierarchie erfolgt nach dem bereits bekannten Vorgehen. Es werden getrennt fugale und petale Einflüsse untersucht und bewertet und die

Ergebnisse anschließend verknüpft. Diese Verknüpfung dient als Grundlage der Hierarchiengenese.

Die folgende Abbildung zeigt den fugalen Einfluss der Funktionseinheiten. Von den vier möglichen Niveaus sind nur die drei höheren besetzt. Das bedeutet, dass keine Funktionseinheiten keinen Einfluss auf den Funktionsbetrieb haben.

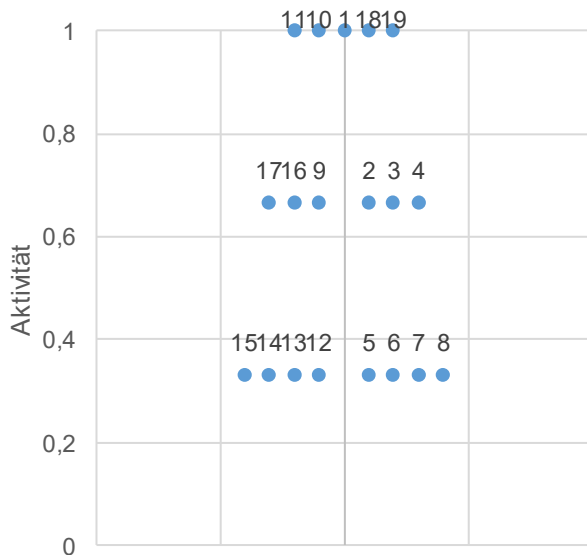


Abbildung 6-37: Fugaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert)

Im Vergleich zu Straßen und Brücken erkennt man hier die herausragende Bedeutung des Brandschutzes, der sich auf mehrere Funktionseinheiten auswirkt. Zusammen mit den sicherheitsrelevanten Funktionseinheiten stellen sie jene Einheiten dar, die sich in entsprechenden Zwischenfällen (Brand, Unfall, etc.) als wichtig für Leib und Leben der Straßenverkehrsteilnehmer herausstellen.

Die gleichen Funktionseinheiten wurden in Hinsicht auf die petalen Einflüsse untersucht. Im Rahmen der Wechselwirkungsanalyse ergeben sie quantitative Werte zur Beschreibung der Einflüsse. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Analyse.

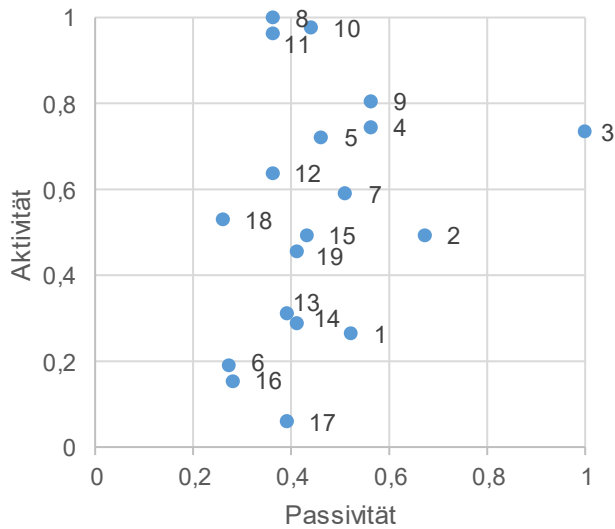


Abbildung 6-38: Petaler Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal

Auch im petalen Bereich ist der Brandschutz mit hoher Aktivität vertreten. Zusätzlich dazu ist der Tunnelausbau der Kostengruppe 300 vergleichsweise aktiv. Dazu zählen vor allem Innenschale, Auffüllung, (Anprall-)Wände, Kappen und Gehwege, aber auch die Fahrbahn. Wesentlich weniger Aktivität weisen dagegen Kommunikationseinrichtungen und Videoüberwachung auf, da solche Funktionseinheiten tendenziell passiver Natur sind.

Im nächsten Schritt werden die fugalen sowie die petalen Einflüsse miteinander verknüpft. Die Robustheit in Abhängigkeit von den fugalen Einflüssen wird dazu auf die petalen Einflüsse angewendet. Als Ergebnis ergibt sich das folgende Bild:

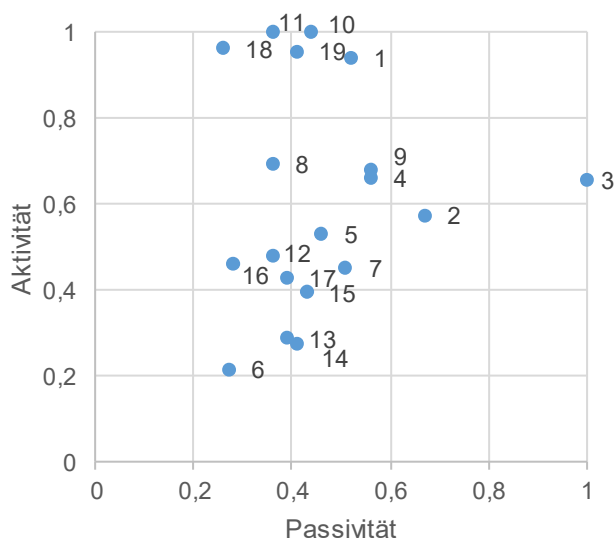


Abbildung 6-39: Verknüpfter Einfluss der Funktionseinheiten (normiert); Aktivität vertikal, Passivität horizontal

Da die brandschutzrelevanten Funktionseinheiten im petalen Bereich einen großen Einfluss genießen, ändert sich in deren Position praktisch nichts. Zu nennenswerten Änderungen kommt es nur in der Außenschale, die einen Bedeutungsgewinn aufgrund ihres stark schützenden Charakters erfährt sowie in den Funktionseinheiten der Überwachung, namentlich Kommunikation und Videoüberwachung. Jene brandschutztechnischen Funktionseinheiten, deren petaler Einfluss nur mittelgroß ist, wie Brandmeldeanlagen und Löscheinrichtungen erfahren einen entsprechenden Zugewinn an Bedeutung.

Basierend auf den resultierenden Aktivitäten lässt sich eine Hierarchie ableiten. In den folgenden beiden Abbildungen ist die Hierarchie dargestellt, in der zweiten um eine qualitative Komponente, das Bedeutungsmaß, erweitert.

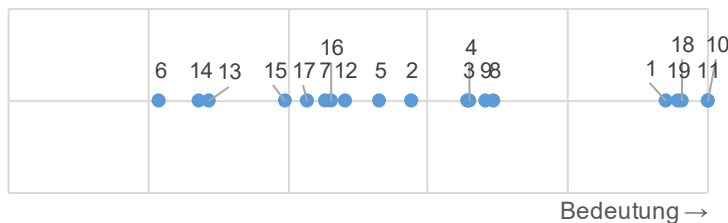


Abbildung 6-40: Hierarchische Darstellung der Funktionseinheiten (steigend von links nach rechts)

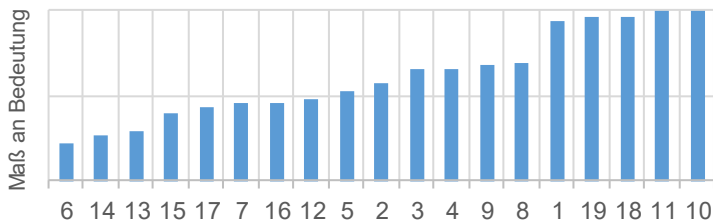


Abbildung 6-41: Verhältnismäßiger Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten

Wie zu erwarten, dominieren die brandschutztechnischen Funktionseinheiten die Hierarchie. Gefolgt werden sie von den statisch relevanten Tunnelteilen, wie Außen- und Innenwand sowie den Ausbauelementen der Kostengruppe 300. Zu diesen gehören vor allem die Wände, Kappen und Auffüllungen. In diesem Bereich findet sich zudem die Fahrbahn.

Von geringerer Bedeutung sind dagegen viele Funktionseinheiten, die dem Funktionsbetrieb direkt zuzuordnen sind, aber zumindest im regulären Betrieb optional sind. Dazu gehört unter anderem die Beleuchtung. Wie bereits bei den anderen Analysen handelt es sich um eine optionale Komponente, trotz obligatorischen Vorhandenseins. Ähnliches gilt für die Belüftung. In der Regel übernimmt der Verkehr die Belüftung des Tunnels. Auch der Entwässerung kommt wenig Bedeutung zu. Das ist plausibel, da sie im Allgemeinen nur das eingefahrene Wasser ableiten muss, aber keinen Regen.

6.3 Kritikalitätsbestimmung auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Bedeutung

Die vereinende und bewertende Darstellung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Aspekte erfolgt über das Kritikalitätsmaß. Mithilfe dieses Maßes wird jeder Funktionseinheit an jedem beliebigen Ort ein eindeutiger Wert zugeordnet. Unabhängig von diesen Werten kann ein Objekt als Summe seiner Funktionseinheiten einzelwirtschaftlich in Beziehung gesetzt werden. Ebenso kann auf übergeordneter Ebene der sozioökonomische Zusammenhang verschiedener Objekte betrachtet werden. In beiden Betrachtungsweisen ist die Hierarchie, die vor dem Hintergrund der Bedeutung erzeugt wird, maßgebend.

Mit den Werten des Kritikalitätsmaßes kann dann resultierend eine Hierarchie erzeugt werden, welche die beiden zuvor genannten Kriterien vereinigt. Diese kann und soll als Grundlage für die Planung der Instandhaltung gelten. Dabei ist das Kritikalitätsmaß als Indikator zu verstehen, der den Nutzenverlust, infolge eines Ausfalls der Funktionseinheit, angibt. Je höher das Maß, desto höher der Nutzenverlust.

Die Anwendung der Zuordnung der Instandhaltungsstrategien soll dem Beispiel der Bundesautobahnen weiter folgen. Prinzipiell kann der Bereich bzw. Ausschnitt, der untersucht wird, beliebig gewählt werden. Sinnvoll scheinen vor allem Auswahlbereiche, die gleichen Organen unterstehen. Das kann das Netz der deutschen Bundesautobahnen sein, genauso aber auch ein kommunales Straßennetz. Die Betrachtung mittels ausgewählter Bereiche ist auch vor dem Hintergrund der Anzahl der Objekte sinnvoll. Diese ist in der Regel sehr hoch. Für die ordinalen Zusammenhänge ist das zwar kein Problem, sehr wohl aber für die Übersicht einer exemplarischen Darstellung.

6.3.1 Instandhaltung als Interpretation der Hierarchie der Straßeninfrastruktur

In der folgenden Abbildung sei die Kritikalitätsmatrix der Bundesautobahnen gegeben. Dabei wurden solche berücksichtigt, die mindestens fünf Zählstellen aufweisen. Es handelt sich um die Straßeninfrastruktur, d. h. ohne Tunnel und Brücken. Entsprechend der wirtschaftlichen Leistung auf der einen sowie der spezifischen Einflüsse der Funktionseinheiten auf der anderen Seite, ergibt sich die Kritikalitätsmatrix.

		Funktionseinheiten											
		FE 7	FE 12	FE 10	FE 11	FE 6	FE 9	FE 2	FE 3	FE 8	FE 4	FE 5	FE 1
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,70895	0,71443	0,72967	0,73226	0,76487	0,77736	0,80577	0,83569	0,84395	0,87286	0,92591	1,00000
	99	0,58617	0,59279	0,61107	0,61416	0,65270	0,66729	0,70019	0,73442	0,74380	0,77645	0,83565	0,91705
	3	0,57711	0,58384	0,60239	0,60552	0,64457	0,65935	0,69262	0,72721	0,73669	0,76963	0,82932	0,91129
	5	0,52788	0,53523	0,55540	0,55879	0,60090	0,61672	0,65217	0,68879	0,69879	0,73344	0,79584	0,88094
	9	0,51027	0,51787	0,53869	0,54219	0,58549	0,60171	0,63800	0,67539	0,68558	0,72087	0,78428	0,87050
	61	0,46459	0,47293	0,49564	0,49944	0,54614	0,56350	0,60209	0,64158	0,65230	0,68929	0,75535	0,84454
	40	0,46288	0,47124	0,49404	0,49785	0,54468	0,56209	0,60077	0,64034	0,65108	0,68814	0,75430	0,84360
	67	0,45889	0,46733	0,49030	0,49414	0,54130	0,55881	0,59770	0,63747	0,64825	0,68546	0,75186	0,84141
	57	0,45726	0,46572	0,48877	0,49263	0,53991	0,55747	0,59645	0,63629	0,64710	0,68437	0,75086	0,84052
	42	0,44496	0,45365	0,47729	0,48123	0,52953	0,54742	0,58707	0,62751	0,63847	0,67621	0,74344	0,83390
	10	0,43579	0,44466	0,46876	0,47277	0,52186	0,54000	0,58016	0,62104	0,63211	0,67022	0,73799	0,82904
	4	0,43083	0,43980	0,46414	0,46820	0,51772	0,53600	0,57644	0,61757	0,62870	0,66700	0,73507	0,82644
	81	0,42074	0,42992	0,45480	0,45893	0,50936	0,52793	0,56894	0,61058	0,62183	0,66053	0,72920	0,82123
	1	0,38827	0,39820	0,42493	0,42936	0,48288	0,50243	0,54536	0,58867	0,60034	0,64033	0,71096	0,80508
	8	0,37988	0,39003	0,41729	0,42179	0,47616	0,49598	0,53943	0,58317	0,59495	0,63528	0,70642	0,80107
	6	0,37835	0,38854	0,41589	0,42041	0,47494	0,49481	0,53835	0,58218	0,59397	0,63437	0,70559	0,80034
	7	0,37474	0,38502	0,41261	0,41716	0,47207	0,49205	0,53581	0,57984	0,59168	0,63222	0,70366	0,79864
	45	0,37086	0,38125	0,40909	0,41369	0,46900	0,48911	0,53311	0,57734	0,58923	0,62993	0,70161	0,79683
	30	0,37024	0,38064	0,40852	0,41312	0,46850	0,48863	0,53267	0,57694	0,58884	0,62956	0,70128	0,79654
	92	0,35868	0,36941	0,39808	0,40280	0,45943	0,47994	0,52471	0,56959	0,58164	0,62284	0,69525	0,79123
	14	0,35257	0,36348	0,39259	0,39737	0,45467	0,47539	0,52055	0,56576	0,57789	0,61934	0,69211	0,78848
	46	0,33621	0,34763	0,37796	0,38292	0,44210	0,46338	0,50961	0,55571	0,56806	0,61017	0,68392	0,78130
	44	0,33059	0,34220	0,37297	0,37800	0,43785	0,45932	0,50592	0,55233	0,56475	0,60710	0,68118	0,77890
	60	0,32795	0,33965	0,37063	0,37569	0,43585	0,45742	0,50420	0,55075	0,56321	0,60566	0,67990	0,77778
	59	0,30840	0,32082	0,35345	0,35876	0,42135	0,44362	0,49171	0,53934	0,55205	0,59530	0,67069	0,76974
	52	0,30764	0,32008	0,35278	0,35810	0,42079	0,44308	0,49123	0,53891	0,55163	0,59491	0,67034	0,76944
	96	0,30261	0,31525	0,34841	0,35379	0,41713	0,43961	0,48810	0,53605	0,54884	0,59232	0,66805	0,76744
	72	0,30092	0,31363	0,34694	0,35235	0,41590	0,43845	0,48705	0,53510	0,54791	0,59146	0,66728	0,76678
	93	0,29674	0,30962	0,34332	0,34878	0,41289	0,43559	0,48448	0,53276	0,54562	0,58935	0,66541	0,76515
	48	0,28695	0,30025	0,33490	0,34049	0,40591	0,42898	0,47855	0,52737	0,54036	0,58448	0,66110	0,76140
	24	0,27805	0,29176	0,32730	0,33302	0,39966	0,42308	0,47326	0,52258	0,53569	0,58016	0,65728	0,75809
	38	0,26581	0,28012	0,31698	0,32288	0,39125	0,41514	0,46618	0,51618	0,52944	0,57440	0,65220	0,75369
	27	0,25606	0,27088	0,30884	0,31490	0,38469	0,40896	0,46069	0,51122	0,52461	0,56995	0,64829	0,75031
	66	0,25380	0,26875	0,30697	0,31307	0,38319	0,40755	0,45944	0,51009	0,52351	0,56894	0,64740	0,74954
	73	0,25362	0,26858	0,30682	0,31292	0,38307	0,40744	0,45934	0,51000	0,52343	0,56886	0,64733	0,74948
	94	0,24445	0,25994	0,29929	0,30554	0,37706	0,40180	0,45434	0,50551	0,51905	0,56483	0,64379	0,74643
	63	0,24313	0,25869	0,29821	0,30448	0,37621	0,40099	0,45363	0,50487	0,51842	0,56426	0,64329	0,74599
	65	0,23331	0,24949	0,29026	0,29669	0,36994	0,39511	0,44844	0,50021	0,51389	0,56010	0,63964	0,74285
	39	0,23328	0,24946	0,29023	0,29667	0,36992	0,39510	0,44843	0,50020	0,51388	0,56008	0,63963	0,74284
	70	0,21354	0,23110	0,27462	0,28141	0,35780	0,38377	0,43848	0,49130	0,50522	0,55215	0,63270	0,73688
	650	0,20630	0,22444	0,26903	0,27597	0,35353	0,37980	0,43500	0,48820	0,50221	0,54940	0,63030	0,73482
	620	0,19794	0,21677	0,26267	0,26977	0,34871	0,37532	0,43110	0,48473	0,49883	0,54631	0,62761	0,73251
	33	0,19781	0,21666	0,26257	0,26967	0,34864	0,37525	0,43104	0,48467	0,49878	0,54626	0,62757	0,73248
	23	0,18115	0,20156	0,25026	0,25770	0,33947	0,36674	0,42366	0,47812	0,49241	0,54045	0,62252	0,72816
	623	0,17973	0,20029	0,24924	0,25671	0,33871	0,36604	0,42305	0,47758	0,49189	0,53998	0,62211	0,72780
	20	0,16817	0,18998	0,24103	0,24875	0,33272	0,36051	0,41827	0,47335	0,48778	0,53624	0,61886	0,72504
	31	0,16210	0,18463	0,23684	0,24469	0,32970	0,35772	0,41587	0,47123	0,48573	0,53437	0,61725	0,72365
	19	0,15919	0,18208	0,23486	0,24277	0,32827	0,35641	0,41474	0,47024	0,48476	0,53349	0,61649	0,72301
	71	0,14437	0,16927	0,22507	0,23332	0,32135	0,35004	0,40928	0,46543	0,48010	0,52926	0,61283	0,71989
	62	0,10248	0,13533	0,20079	0,20999	0,30483	0,33494	0,39645	0,45418	0,46921	0,51940	0,60433	0,71267

Abbildung 6-42: Kritikalitätsmatrix der BAB (mind. 5 Zählstellen)

Die hierarchische Ordnung ist so gewählt, dass die Matrix, entsprechend der vereinbarten Konventionen, oben rechts den Wert 1,00 aufweist, das Minimum liegt unten links. Es ergeben sich neben dem obligatorischen Maximum von 1,00 ein 0,75-Quantil von 0,6226, ein 0,50-Quantil von 0,5002, ein 0,25-Quantil von 0,3811 sowie ein Minimum von 0,1025. Diese fünf Werte können und sollen sogleich als Grenzen für die Wahl der Instandhaltungsarten aufgefasst werden. Dadurch ergibt sich das folgende Bild, bei dem jeder Instandhaltungsstrategie eine entsprechende Farbe zugeordnet wurde.

		Funktionseinheiten											
		FE 7	FE 12	FE 10	FE 11	FE 6	FE 9	FE 2	FE 3	FE 8	FE 4	FE 5	FE 1
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,70895	0,71443	0,72967	0,73226	0,76487	0,77736	0,80577	0,83569	0,84395	0,87286	0,92591	1,00000
	99	0,58617	0,59279	0,61107	0,61416	0,65270	0,66729	0,70019	0,73442	0,74380	0,77645	0,83565	0,91706
	3	0,57711	0,58384	0,60239	0,60552	0,64457	0,65935	0,69262	0,72721	0,73669	0,76963	0,82932	0,91129
	5	0,52788	0,53523	0,55540	0,55879	0,60090	0,61672	0,65217	0,68879	0,69879	0,73344	0,79584	0,88094
	9	0,51027	0,51787	0,53869	0,54219	0,58549	0,60171	0,63800	0,67539	0,68558	0,72087	0,78428	0,87050
	61	0,46459	0,47293	0,49564	0,49944	0,54614	0,56350	0,60209	0,64158	0,65230	0,68929	0,75535	0,84454
	40	0,46288	0,47124	0,49404	0,49785	0,54468	0,56209	0,60077	0,64034	0,65108	0,68814	0,75430	0,84360
	57	0,45889	0,46733	0,49030	0,49414	0,54130	0,55881	0,59770	0,63747	0,64825	0,68546	0,75186	0,84141
	67	0,45726	0,46572	0,48877	0,49263	0,53991	0,55747	0,59645	0,63629	0,64710	0,68437	0,75086	0,84052
	42	0,44496	0,45365	0,47729	0,48123	0,52953	0,54742	0,58707	0,62751	0,63847	0,67621	0,74344	0,83390
	10	0,43579	0,44466	0,46876	0,47277	0,52186	0,54000	0,58016	0,62104	0,63211	0,67022	0,73799	0,82904
	4	0,43083	0,43980	0,46414	0,46820	0,51772	0,53600	0,57644	0,61757	0,62870	0,66700	0,73507	0,82644
	81	0,42074	0,42992	0,45480	0,45893	0,50936	0,52793	0,56894	0,61058	0,62183	0,66053	0,72920	0,82123
	1	0,38827	0,39820	0,42493	0,42936	0,48288	0,50243	0,54536	0,58867	0,60034	0,64033	0,71096	0,80508
	8	0,37988	0,39003	0,41729	0,42179	0,47616	0,49598	0,53943	0,58317	0,59495	0,63528	0,70642	0,80107
	6	0,37835	0,38854	0,41589	0,42041	0,47494	0,49481	0,53835	0,58218	0,59397	0,63437	0,70559	0,80034
	7	0,37474	0,38502	0,41261	0,41716	0,47207	0,49205	0,53581	0,57984	0,59168	0,63222	0,70366	0,79864
	45	0,37086	0,38125	0,40909	0,41369	0,46900	0,48911	0,53311	0,57734	0,58923	0,62993	0,70161	0,79683
	30	0,37024	0,38064	0,40852	0,41312	0,38110	0,48863	0,53267	0,57694	0,58884	0,62956	0,70128	0,79654
	92	0,35868	0,36941	0,39808	0,40280	0,45943	0,47994	0,52471	0,56959	0,58164	0,62284	0,69525	0,79123
	14	0,35257	0,36348	0,39259	0,39737	0,45467	0,47539	0,52055	0,56576	0,57789	0,61934	0,69211	0,78848
	46	0,33621	0,34763	0,37796	0,38292	0,44210	0,46338	0,50961	0,55571	0,56806	0,61017	0,68392	0,78130
	44	0,33059	0,34220	0,37297	0,37800	0,43785	0,45932	0,50592	0,55233	0,56475	0,60710	0,68118	0,77890
	60	0,32795	0,33965	0,37063	0,37569	0,43585	0,45742	0,50420	0,55075	0,56321	0,60566	0,67990	0,77778
	59	0,30840	0,32082	0,35345	0,35876	0,42135	0,44362	0,49171	0,53934	0,55205	0,59530	0,67069	0,76974
	52	0,30764	0,32008	0,35278	0,35810	0,42079	0,44308	0,49123	0,53891	0,55163	0,59491	0,67034	0,76944
	96	0,30261	0,31525	0,34841	0,35379	0,41713	0,43961	0,48810	0,53605	0,54884	0,59232	0,66805	0,76744
	72	0,30092	0,31363	0,34694	0,35235	0,41590	0,43845	0,48705	0,53510	0,54791	0,59146	0,66728	0,76678
	93	0,29674	0,30962	0,34332	0,34878	0,41289	0,43559	0,48448	0,53276	0,54562	0,58935	0,66541	0,76515
	48	0,28695	0,30025	0,33490	0,34049	0,40591	0,42898	0,47855	0,52737	0,54036	0,58448	0,66110	0,76140
	24	0,27805	0,29176	0,32730	0,33302	0,39966	0,42308	0,47326	0,52258	0,53569	0,58016	0,65728	0,75809
	38	0,26581	0,28012	0,31698	0,32288	0,39125	0,41514	0,46618	0,51618	0,52944	0,57440	0,65220	0,75369
	27	0,25606	0,27088	0,30884	0,31490	0,38469	0,40896	0,46069	0,51122	0,52461	0,56995	0,64829	0,75031
	66	0,25380	0,26875	0,30697	0,31307	0,38319	0,40755	0,45944	0,51009	0,52351	0,56894	0,64740	0,74954
	73	0,25362	0,26858	0,30682	0,31292	0,38307	0,40744	0,45934	0,51000	0,52343	0,56886	0,64733	0,74948
	94	0,24445	0,25994	0,29929	0,30554	0,37706	0,40180	0,45434	0,50551	0,51905	0,56483	0,64379	0,74643
	63	0,24313	0,25869	0,29821	0,30448	0,37621	0,40099	0,45363	0,50487	0,51842	0,56426	0,64329	0,74599
	65	0,23331	0,24949	0,29026	0,29669	0,36994	0,39511	0,44844	0,50021	0,51389	0,56010	0,63964	0,74285
	39	0,23328	0,24946	0,29023	0,29667	0,36992	0,39510	0,44843	0,50020	0,51388	0,56008	0,63963	0,74284
	70	0,21354	0,23110	0,27462	0,28141	0,35780	0,38377	0,43848	0,49130	0,50522	0,55215	0,63270	0,73688
	650	0,20630	0,22444	0,26903	0,27597	0,35353	0,37980	0,43500	0,48820	0,50221	0,54940	0,63030	0,73482
	620	0,19794	0,21677	0,26267	0,26977	0,34871	0,37532	0,43110	0,48473	0,49883	0,54631	0,62761	0,73251
	33	0,19781	0,21666	0,26257	0,26967	0,34864	0,37525	0,43104	0,48467	0,49878	0,54626	0,62757	0,73248
	23	0,18115	0,20156	0,25026	0,25770	0,33947	0,36674	0,42366	0,47812	0,49241	0,54045	0,62252	0,72816
	623	0,17973	0,20029	0,24924	0,25671	0,33871	0,36604	0,42305	0,47758	0,49189	0,53998	0,62211	0,72780
	20	0,16817	0,18998	0,24103	0,24875	0,33272	0,36051	0,41827	0,47335	0,48778	0,53624	0,61886	0,72504
	31	0,16210	0,18463	0,23684	0,24469	0,32970	0,35772	0,41587	0,47123	0,48573	0,53437	0,61725	0,72365
	19	0,15919	0,18208	0,23486	0,24277	0,32827	0,35641	0,41474	0,47024	0,48476	0,53349	0,61649	0,72301
	71	0,14437	0,16927	0,22507	0,23332	0,32135	0,35004	0,40928	0,46543	0,48010	0,52926	0,61283	0,71989
	62	0,10248	0,13533	0,20079	0,20999	0,30483	0,33494	0,39645	0,45418	0,46921	0,51940	0,60433	0,71267

Abbildung 6-43: Darstellung der empfohlenen Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität

Unter den gegebenen Parametern lassen sich nun bezüglich der vorgeschlagenen Instandhaltungsstrategie Aussagen tätigen. So ist die Bundesautobahn 2 genauso wie die Funktionseinheit 1 (Unterbau) eines ausgebauten Straßenkörpers von so hoher Kritikalität, dass sie über die Funktionseinheiten (BAB 2) bzw. über die Bundesautobahnen (FE 1) betrachtet, stets die höchste Instandhaltungsstrategie verdient, die vorausbestimmte. Selbst die unkritischste Funktionseinheit 7 (Zäune) sollte bei dieser Straße aktiv, vorausbestimmt instandgehalten werden. Das liegt der überlagerten Bedeutung der beiden Aspekte zugrunde, der Wirtschaftlichkeit der BAB 2 auf der einen Seite und der individuellen Bedeutung der Funktionseinheit des Objektes auf der anderen Seite. Im Falle eines Aus- bzw. Wegfalls des Zaunes ist die Gefahr für den Funktionsbetrieb bspw. ein Wildunfall, da das Tier nicht von der Fahrbahn ferngehalten wird. Daraus kann ein Unfall resultieren, der neben dem Tier auch Verkehrsteilnehmer gefährdet und verletzt. Dies führt zu einer polizeilichen Ermittlung und der vorübergehenden Sperrung eines Teils (z.B. einer Fahrspur) der Fahrbahn. Nun ist die wirtschaftliche Bedeutung der BAB 2 so hoch, dass bereits diese Teilsperre zu einem signifikanten Nutzenverlust führt. Die Folge dieser Kausalkette bestätigt die Kritikalität der FE 7 an der BAB 2.

Neben Aussagen hinsichtlich der verlangten Instandhaltungsstrategie können beliebige qualitative und quantitative Aussagen hinsichtlich des Kritikalitätsmaßes getätigt werden. So kann bspw. die Kritikalität einer beliebigen spezifischen Funktionseinheit (BAB 4; FE 3) gegenüber einer anderen (BAB 66; FE 9) durch den Quotienten (BAB 4; FE 3) / (BAB 66; FE 9) ausgedrückt werden. Das führt zu einer Aussage „(BAB 4; FE 3) ist [(BAB 4; FE 3) / (BAB 66; FE 9)] = 0,61757 / 0,40755 = 1,515-mal so kritisch wie (BAB 66; FE 9)“. Analog sind auch andere logische Aussagen möglich.

6.3.2 Instandhaltung als Interpretation der Hierarchie der Brückeninfrastruktur

Basierend auf der Auswahl der Straßeninfrastruktur aus 6.3.1 werden die Bundesautobahnen im Folgenden um ihre Brücken erweitert. Das Vorgehen wird analog fortgeführt. Die folgende Kritikalitätsmatrix ergibt sich auf Basis der wirtschaftlichen Leistung des Verkehrs, der die Brücke passiert, auf der einen sowie der spezifischen Einflüsse der Funktionseinheiten der Brücken auf der anderen Seite:

		Funktionseinheiten																		
		FE 19	FE 12	FE 16	FE 15	FE 14	FE 11	FE 18	FE 13	FE 3	FE 10	FE 17	FE 5	FE 2	FE 6	FE 9	FE 8	FE 4	FE 1	FE 7
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,7148	0,7203	0,7211	0,7257	0,7294	0,7334	0,7542	0,7589	0,7938	0,8136	0,8192	0,8226	0,8398	0,8643	0,8643	0,9134	0,9248	0,9802	1,0000
	99	0,5932	0,5998	0,6009	0,6063	0,6107	0,6155	0,6401	0,6458	0,6863	0,7091	0,7155	0,7194	0,7391	0,7668	0,7668	0,8218	0,8345	0,8954	0,9171
	3	0,5842	0,5910	0,5920	0,5976	0,6020	0,6069	0,6319	0,6375	0,6786	0,7017	0,7081	0,7121	0,7319	0,7599	0,7599	0,8153	0,8281	0,8895	0,9113
	5	0,5357	0,5430	0,5441	0,5502	0,5550	0,5602	0,5872	0,5933	0,6373	0,6618	0,6686	0,6728	0,6937	0,7232	0,7232	0,7813	0,7946	0,8584	0,8809
	9	0,5183	0,5259	0,5271	0,5333	0,5383	0,5437	0,5715	0,5777	0,6228	0,6478	0,6548	0,6591	0,6804	0,7105	0,7105	0,7695	0,7830	0,8477	0,8705
	61	0,4734	0,4817	0,4830	0,4898	0,4952	0,5011	0,5311	0,5378	0,5859	0,6125	0,6199	0,6244	0,6469	0,6784	0,6784	0,7400	0,7540	0,8210	0,8445
	40	0,4717	0,4801	0,4813	0,4881	0,4936	0,4995	0,5296	0,5363	0,5846	0,6112	0,6186	0,6231	0,6457	0,6772	0,6772	0,7389	0,7530	0,8200	0,8436
	57	0,4678	0,4762	0,4775	0,4844	0,4899	0,4958	0,5261	0,5329	0,5814	0,6082	0,6156	0,6201	0,6428	0,6745	0,6745	0,7364	0,7505	0,8178	0,8414
	67	0,4662	0,4746	0,4759	0,4828	0,4883	0,4943	0,5247	0,5315	0,5801	0,6069	0,6144	0,6189	0,6416	0,6734	0,6734	0,7354	0,7495	0,8168	0,8405
	42	0,4542	0,4626	0,4641	0,4712	0,4768	0,4829	0,5140	0,5209	0,5705	0,5977	0,6053	0,6099	0,6329	0,6651	0,6651	0,7278	0,7421	0,8100	0,8339
	10	0,4452	0,4540	0,4554	0,4625	0,4683	0,4745	0,5061	0,5131	0,5634	0,5909	0,5986	0,6033	0,6265	0,6590	0,6590	0,7222	0,7366	0,8050	0,8290
	4	0,4403	0,4492	0,4506	0,4579	0,4637	0,4699	0,5018	0,5089	0,5595	0,5873	0,5950	0,5997	0,6231	0,6557	0,6557	0,7193	0,7337	0,8024	0,8264
	81	0,4305	0,4396	0,4410	0,4484	0,4543	0,4607	0,4932	0,5004	0,5518	0,5799	0,5877	0,5925	0,6162	0,6492	0,6492	0,7133	0,7278	0,7970	0,8212
	1	0,3988	0,4086	0,4101	0,4181	0,4244	0,4312	0,4658	0,4734	0,5274	0,5568	0,5649	0,5699	0,5945	0,6286	0,6286	0,6946	0,7096	0,7803	0,8051
	8	0,3906	0,4006	0,4022	0,4103	0,4168	0,4237	0,4588	0,4666	0,5213	0,5510	0,5592	0,5642	0,5890	0,6235	0,6235	0,6899	0,7050	0,7762	0,8011
	6	0,3891	0,3992	0,4007	0,4089	0,4154	0,4223	0,4575	0,4653	0,5202	0,5499	0,5582	0,5632	0,5880	0,6225	0,6225	0,6891	0,7042	0,7754	0,8003
	7	0,3856	0,3958	0,3973	0,4055	0,4121	0,4191	0,4545	0,4624	0,5176	0,5475	0,5557	0,5607	0,5857	0,6203	0,6203	0,6871	0,7022	0,7737	0,7986
	45	0,3819	0,3921	0,3937	0,4020	0,4086	0,4156	0,4514	0,4593	0,5148	0,5448	0,5531	0,5582	0,5832	0,6180	0,6180	0,6850	0,7002	0,7718	0,7968
	30	0,3813	0,3915	0,3931	0,4014	0,4080	0,4151	0,4508	0,4588	0,5143	0,5444	0,5527	0,5577	0,5828	0,6176	0,6176	0,6847	0,6998	0,7715	0,7965
	92	0,3700	0,3806	0,3822	0,3907	0,3975	0,4048	0,4414	0,4495	0,5061	0,5366	0,5450	0,5501	0,5756	0,6108	0,6108	0,6785	0,6938	0,7660	0,7912
	14	0,3641	0,3748	0,3765	0,3851	0,3920	0,3994	0,4365	0,4446	0,5018	0,5325	0,5410	0,5462	0,5718	0,6072	0,6072	0,6753	0,6907	0,7632	0,7885
	46	0,3483	0,3595	0,3612	0,3702	0,3774	0,3850	0,4233	0,4318	0,4904	0,5218	0,5305	0,5358	0,5618	0,5979	0,5979	0,6669	0,6825	0,7558	0,7813
	44	0,3429	0,3542	0,3560	0,3651	0,3724	0,3801	0,4189	0,4274	0,4866	0,5182	0,5270	0,5322	0,5585	0,5947	0,5947	0,6641	0,6797	0,7533	0,7789
	60	0,3403	0,3518	0,3535	0,3627	0,3700	0,3778	0,4168	0,4254	0,4848	0,5166	0,5253	0,5306	0,5569	0,5932	0,5932	0,6628	0,6784	0,7521	0,7778
	59	0,3215	0,3336	0,3355	0,3452	0,3528	0,3610	0,4016	0,4105	0,4718	0,5043	0,5133	0,5188	0,5457	0,5827	0,5827	0,6533	0,6692	0,7438	0,7697
	52	0,3208	0,3329	0,3348	0,3445	0,3522	0,3604	0,4010	0,4099	0,4713	0,5039	0,5129	0,5183	0,5452	0,5823	0,5823	0,6530	0,6688	0,7435	0,7694
	96	0,3160	0,3283	0,3302	0,3400	0,3478	0,3561	0,3972	0,4062	0,4680	0,5009	0,5099	0,5153	0,5424	0,5796	0,5796	0,6506	0,6665	0,7414	0,7674
	72	0,3144	0,3267	0,3286	0,3385	0,3463	0,3546	0,3959	0,4049	0,4669	0,4998	0,5089	0,5143	0,5415	0,5787	0,5787	0,6498	0,6658	0,7407	0,7668
	93	0,3104	0,3229	0,3248	0,3348	0,3427	0,3511	0,3927	0,4018	0,4642	0,4973	0,5064	0,5119	0,5391	0,5766	0,5766	0,6479	0,6639	0,7391	0,7651
	48	0,3010	0,3139	0,3159	0,3261	0,3342	0,3429	0,3854	0,3946	0,4580	0,4916	0,5007	0,5063	0,5338	0,5716	0,5716	0,6435	0,6596	0,7352	0,7614
	24	0,2926	0,3058	0,3078	0,3183	0,3266	0,3354	0,3788	0,3882	0,4525	0,4864	0,4957	0,5013	0,5291	0,5672	0,5672	0,6396	0,6558	0,7318	0,7581
	38	0,2810	0,2947	0,2968	0,3077	0,3163	0,3254	0,3699	0,3796	0,4451	0,4795	0,4889	0,4946	0,5228	0,5613	0,5613	0,6343	0,6507	0,7272	0,7537
	27	0,2717	0,2859	0,2881	0,2993	0,3081	0,3175	0,3630	0,3728	0,4393	0,4742	0,4837	0,4895	0,5179	0,5567	0,5567	0,6303	0,6467	0,7237	0,7503
	66	0,2696	0,2839	0,2861	0,2974	0,3063	0,3156	0,3614	0,3712	0,4380	0,4730	0,4825	0,4883	0,5168	0,5557	0,5557	0,6294	0,6459	0,7229	0,7495
	73	0,2694	0,2838	0,2859	0,2972	0,3061	0,3155	0,3613	0,3711	0,4379	0,4729	0,4824	0,4882	0,5167	0,5556	0,5556	0,6293	0,6458	0,7228	0,7495
	94	0,2608	0,2756	0,2778	0,2894	0,2985	0,3082	0,3549	0,3649	0,4327	0,4680	0,4777	0,4835	0,5122	0,5515	0,5515	0,6257	0,6422	0,7197	0,7464
	63	0,2596	0,2744	0,2767	0,2883	0,2975	0,3071	0,3540	0,3640	0,4319	0,4673	0,4770	0,4828	0,5116	0,5509	0,5509	0,6252	0,6417	0,7192	0,7460
	65	0,2504	0,2658	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4721	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7160	0,7429
	39	0,2504	0,2657	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4720	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7159	0,7428
	70	0,2321	0,2486	0,2511	0,2639	0,2738	0,2843	0,3343	0,3450	0,4160	0,4526	0,4626	0,4686	0,4982	0,5385	0,5385	0,6143	0,6311	0,7098	0,7369
	650	0,2255	0,2424	0,2449	0,2580	0,2682	0,2789	0,3298	0,3405	0,4123	0,4493	0,4593	0,4654	0,4952	0,5357	0,5357	0,6118	0,6287	0,7076	0,7348
	620	0,2178	0,2353	0,2379	0,2514	0,2618	0,2728	0,3246	0,3355	0,4082	0,4455	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
	33	0,2177	0,2352	0,2378	0,2513	0,2617	0,2727	0,3245	0,3355	0,4081	0,4454	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
	23	0,2027	0,2214	0,2242	0,2384	0,2494	0,2608	0,3146	0,3259	0,4003	0,4383	0,4486	0,4548	0,4852	0,5265	0,5265	0,6038	0,6209	0,7007	0,7282
	623	0,2014	0,2202	0,2230	0,2373	0,2484	0,2598	0,3138	0,3251	0,3997	0,4377	0,4480	0,4542	0,4847	0,5260	0,5260	0,6033	0,6205	0,7003	0,7278
	20	0,1912	0,2109	0,2138	0,2287	0,2401	0,2520	0,3074	0,3189	0,3946	0,4331	0,4435	0,4498	0,4805	0,5222	0,5222	0,6000	0,6172	0,6974	0,7250
	31	0,1859	0,2061	0,2091	0,2243	0,2359	0,2480	0,3041	0,3157	0,3921	0,4308	0,4412	0,4475	0,4784	0,5203	0,5203	0,5983	0,6156	0,6960	0,7237
	19	0,1834	0,2038	0,2068	0,2222	0,2339	0,2461	0,3025	0,3142	0,3909	0,4297	0,4402	0,4465	0,4775	0,5194	0,5194	0,5975	0,6149	0,6953	0,7230
	71	0,1706	0,1924	0,1957	0,2118	0,2241	0,2368	0,2950	0,3070	0,3851	0,4244	0,4350	0,4414	0,4727	0,5150	0,5150	0,5938	0,6112	0,6921	0,7199
	62	0,1370	0,1634	0,1672	0,1858	0,1997	0,2138	0,2769	0,2897	0,3714	0,4121	0,4230	0,4295	0,4617	0,5049	0,5049	0,5850	0,6027	0,6846	0,7127

Abbildung 6-44: Kritikalitätsmatrix der Brücken an BAB (mind. 5 Zählstellen)

Basierend auf der Kritikalitätsmatrix soll nun die hierarchische Ordnung nach den Grenzwerten gebildet werden. Dazu werden exemplarisch entsprechend der vereinbarten Konventionen die Grenzwerte gebildet. So weist das Maximum den Wert 1,00 auf. Daneben ergeben sich ein 0,75-Quantil von 0,6317, ein 0,50-Quantil von 0,5146, ein 0,25-Quantil von 0,3939 sowie ein Minimum von 0,1370. Die Grenzen entsprechen diesen fünf Werten und sollen die Instandhaltungsstrategien abgrenzen. Das Resultat der Anwendung ist die folgende Abbildung, den Instandhaltungsstrategien sind entsprechende Farben zugeordnet.

		Funktionseinheiten																		
		FE 19	FE 12	FE 16	FE 15	FE 14	FE 11	FE 18	FE 13	FE 3	FE 10	FE 17	FE 5	FE 2	FE 6	FE 9	FE 8	FE 4	FE 1	FE 7
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,7148	0,7203	0,7211	0,7257	0,7294	0,7334	0,7542	0,7589	0,7938	0,8136	0,8192	0,8226	0,8398	0,8643	0,8643	0,9134	0,9248	0,9802	1,0000
	99	0,5932	0,5998	0,6009	0,6063	0,6107	0,6155	0,6401	0,6458	0,6863	0,7091	0,7155	0,7194	0,7391	0,7668	0,7668	0,8218	0,8345	0,8954	0,9171
	3	0,5842	0,5910	0,5920	0,5976	0,6020	0,6069	0,6319	0,6375	0,6786	0,7017	0,7081	0,7121	0,7319	0,7599	0,7599	0,8153	0,8281	0,8895	0,9113
	5	0,5357	0,5430	0,5441	0,5502	0,5550	0,5602	0,5872	0,5933	0,6373	0,6618	0,6686	0,6728	0,6937	0,7232	0,7232	0,7813	0,7946	0,8584	0,8809
	9	0,5183	0,5259	0,5271	0,5333	0,5383	0,5437	0,5715	0,5777	0,6228	0,6478	0,6548	0,6591	0,6804	0,7105	0,7105	0,7695	0,7830	0,8477	0,8705
	61	0,4734	0,4817	0,4830	0,4898	0,4952	0,5011	0,5311	0,5378	0,5859	0,6125	0,6199	0,6244	0,6469	0,6784	0,6784	0,7400	0,7540	0,8210	0,8445
	40	0,4717	0,4801	0,4813	0,4881	0,4936	0,4995	0,5296	0,5363	0,5846	0,6112	0,6186	0,6231	0,6457	0,6772	0,6772	0,7389	0,7530	0,8200	0,8438
	57	0,4678	0,4762	0,4775	0,4844	0,4899	0,4958	0,5261	0,5329	0,5814	0,6082	0,6156	0,6201	0,6428	0,6745	0,6745	0,7364	0,7505	0,8178	0,8414
	67	0,4662	0,4746	0,4759	0,4828	0,4883	0,4943	0,5247	0,5315	0,5801	0,6069	0,6144	0,6189	0,6416	0,6734	0,6734	0,7354	0,7495	0,8168	0,8405
	42	0,4542	0,4628	0,4641	0,4712	0,4768	0,4829	0,5140	0,5209	0,5705	0,5977	0,6053	0,6099	0,6329	0,6651	0,6651	0,7278	0,7421	0,8100	0,8339
	10	0,4452	0,4540	0,4554	0,4625	0,4683	0,4745	0,5061	0,5131	0,5634	0,5909	0,5986	0,6033	0,6265	0,6590	0,6590	0,7222	0,7366	0,8050	0,8290
	4	0,4403	0,4492	0,4506	0,4579	0,4637	0,4699	0,5018	0,5089	0,5595	0,5873	0,5950	0,5997	0,6231	0,6557	0,6557	0,7193	0,7337	0,8024	0,8264
	81	0,4305	0,4396	0,4410	0,4484	0,4543	0,4607	0,4932	0,5004	0,5518	0,5799	0,5877	0,5925	0,6162	0,6492	0,6492	0,7133	0,7278	0,7970	0,8212
	1	0,3988	0,4086	0,4101	0,4181	0,4244	0,4312	0,4658	0,4734	0,5274	0,5568	0,5649	0,5699	0,5945	0,6286	0,6286	0,6946	0,7096	0,7803	0,8051
	8	0,3906	0,4006	0,4022	0,4103	0,4168	0,4237	0,4588	0,4666	0,5213	0,5510	0,5592	0,5642	0,5890	0,6235	0,6235	0,6899	0,7050	0,7762	0,8011
	6	0,3891	0,3992	0,4007	0,4089	0,4154	0,4223	0,4575	0,4653	0,5202	0,5499	0,5582	0,5632	0,5880	0,6225	0,6225	0,6891	0,7042	0,7754	0,8003
	7	0,3856	0,3958	0,3973	0,4055	0,4121	0,4191	0,4545	0,4624	0,5176	0,5475	0,5557	0,5607	0,5857	0,6203	0,6203	0,6871	0,7022	0,7737	0,7986
	45	0,3819	0,3921	0,3937	0,4020	0,4086	0,4156	0,4514	0,4593	0,5148	0,5448	0,5531	0,5582	0,5832	0,6180	0,6180	0,6850	0,7002	0,7718	0,7968
	30	0,3813	0,3915	0,3931	0,4014	0,4080	0,4151	0,4508	0,4588	0,5143	0,5444	0,5527	0,5577	0,5828	0,6176	0,6176	0,6847	0,6998	0,7715	0,7965
	92	0,3700	0,3806	0,3822	0,3907	0,3975	0,4048	0,4414	0,4495	0,5061	0,5366	0,5450	0,5501	0,5756	0,6108	0,6108	0,6785	0,6938	0,7660	0,7912
	14	0,3641	0,3748	0,3765	0,3851	0,3920	0,3994	0,4365	0,4446	0,5018	0,5325	0,5410	0,5462	0,5718	0,6072	0,6072	0,6753	0,6907	0,7632	0,7885
	46	0,3483	0,3595	0,3612	0,3702	0,3774	0,3850	0,4233	0,4318	0,4904	0,5218	0,5305	0,5358	0,5618	0,5979	0,5979	0,6669	0,6825	0,7558	0,7813
	44	0,3429	0,3542	0,3560	0,3651	0,3724	0,3801	0,4189	0,4274	0,4866	0,5182	0,5270	0,5322	0,5585	0,5947	0,5947	0,6641	0,6797	0,7533	0,7789
	60	0,3403	0,3518	0,3535	0,3627	0,3700	0,3778	0,4168	0,4254	0,4848	0,5166	0,5253	0,5306	0,5569	0,5932	0,5932	0,6628	0,6784	0,7521	0,7778
	59	0,3215	0,3336	0,3355	0,3452	0,3528	0,3610	0,4016	0,4105	0,4718	0,5044	0,5133	0,5188	0,5457	0,5827	0,5827	0,6533	0,6692	0,7438	0,7697
	52	0,3208	0,3329	0,3348	0,3445	0,3522	0,3604	0,4010	0,4099	0,4713	0,5039	0,5129	0,5183	0,5452	0,5823	0,5823	0,6530	0,6688	0,7435	0,7694
	96	0,3160	0,3283	0,3302	0,3400	0,3478	0,3561	0,3972	0,4062	0,4680	0,5009	0,5099	0,5153	0,5424	0,5796	0,5796	0,6506	0,6665	0,7414	0,7674
	72	0,3144	0,3267	0,3286	0,3385	0,3463	0,3546	0,3959	0,4049	0,4669	0,4998	0,5089	0,5143	0,5415	0,5787	0,5787	0,6498	0,6658	0,7407	0,7668
	93	0,3104	0,3229	0,3248	0,3348	0,3427	0,3511	0,3927	0,4018	0,4642	0,4973	0,5064	0,5119	0,5391	0,5766	0,5766	0,6479	0,6639	0,7391	0,7651
	48	0,3010	0,3139	0,3159	0,3261	0,3342	0,3429	0,3854	0,3946	0,4580	0,4916	0,5007	0,5063	0,5338	0,5716	0,5716	0,6435	0,6596	0,7352	0,7614
	24	0,2926	0,3058	0,3078	0,3183	0,3266	0,3354	0,3788	0,3882	0,4525	0,4864	0,4957	0,5013	0,5291	0,5672	0,5672	0,6396	0,6558	0,7318	0,7581
	38	0,2810	0,2947	0,2968	0,3077	0,3163	0,3254	0,3699	0,3796	0,4451	0,4795	0,4889	0,4946	0,5228	0,5613	0,5613	0,6343	0,6507	0,7272	0,7537
	27	0,2717	0,2859	0,2881	0,2993	0,3081	0,3175	0,3630	0,3728	0,4393	0,4742	0,4837	0,4895	0,5179	0,5567	0,5567	0,6303	0,6467	0,7237	0,7503
	66	0,2696	0,2839	0,2861	0,2974	0,3063	0,3156	0,3614	0,3712	0,4380	0,4730	0,4825	0,4883	0,5168	0,5557	0,5557	0,6294	0,6459	0,7229	0,7495
	73	0,2694	0,2838	0,2859	0,2972	0,3061	0,3155	0,3613	0,3711	0,4379	0,4729	0,4824	0,4882	0,5167	0,5556	0,5556	0,6293	0,6458	0,7228	0,7495
	94	0,2608	0,2756	0,2778	0,2894	0,2985	0,3082	0,3549	0,3649	0,4327	0,4680	0,4777	0,4835	0,5122	0,5515	0,5515	0,6257	0,6422	0,7197	0,7464
	63	0,2596	0,2744	0,2767	0,2883	0,2975	0,3071	0,3540	0,3640	0,4319	0,4673	0,4770	0,4828	0,5116	0,5509	0,5509	0,6252	0,6417	0,7192	0,7460
	65	0,2504	0,2658	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4721	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7160	0,7429
	39	0,2504	0,2657	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4720	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7159	0,7428
	70	0,2321	0,2486	0,2511	0,2639	0,2738	0,2843	0,3343	0,3450	0,4160	0,4526	0,4626	0,4686	0,4982	0,5385	0,5385	0,6143	0,6311	0,7098	0,7369
	650	0,2255	0,2424	0,2449	0,2580	0,2682	0,2789	0,3298	0,3405	0,4123	0,4493	0,4593	0,4654	0,4952	0,5357	0,5357	0,6118	0,6287	0,7076	0,7348
	620	0,2178	0,2353	0,2379	0,2510	0,2618	0,2728	0,3246	0,3355	0,4082	0,4455	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
	33	0,2177	0,2352	0,2378	0,2513	0,2617	0,2727	0,3245	0,3355	0,4081	0,4454	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
	23	0,2027	0,2214	0,2242	0,2384	0,2494	0,2608	0,3146	0,3259	0,4003	0,4383	0,4486	0,4548	0,4852	0,5265	0,5265	0,6038	0,6209	0,7007	0,7282
	623	0,2014	0,2202	0,2230	0,2373	0,2484	0,2598	0,3138	0,3251	0,3997	0,4377	0,4480	0,4542	0,4847	0,5260	0,5260	0,6033	0,6205	0,7003	0,7278
	20	0,1912	0,2109	0,2138	0,2287	0,2401	0,2520	0,3074	0,3189	0,3946	0,4331	0,4435	0,4498	0,4805	0,5222	0,5222	0,6000	0,6172	0,6974	0,7250
	31	0,1859	0,2061	0,2091	0,2243	0,2359	0,2480	0,3041	0,3157	0,3921	0,4308	0,4412	0,4475	0,4784	0,5203	0,5203	0,5983	0,6156	0,6960	0,7237
	19	0,1834	0,2038	0,2068	0,2222	0,2339	0,2461	0,3025	0,3142	0,3909	0,4297	0,4402	0,4465	0,4775	0,5194	0,5194	0,5975	0,6149	0,6953	0,7230
	71	0,1706	0,1924	0,1957	0,2118	0,2241	0,2368	0,2950	0,3070	0,3851	0,4244	0,4350	0,4414	0,4727	0,5150	0,5150	0,5938	0,6112	0,6921	0,7198
	62	0,1370	0,1634	0,1672	0,1858	0,1997	0,2138	0,2769	0,2897	0,3714	0,4121	0,4230	0,4295	0,4617	0,5049	0,5049	0,5850	0,6027	0,6846	0,7127

Abbildung 6-45: Darstellung der empfohlenen Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität

Wie bereits bei der Betrachtung der Straßeninfrastruktur erfahren auch die Brücken der BAB 2 eine solch hohes Maß an Kritikalität, dass die Funktionseinheiten für diese keine Rolle in Hinsicht auf die Instandhaltungstrategie spielen. Das gleiche gilt umgekehrt für die beiden Funktionseinheiten mit der höchsten Kritikalität, das Geländer sowie die Gründung. Beide sind für die Brücke, unabhängig von der BAB der sie angehören, von so großer Bedeutung, dass sie vorausbestimmt inandgehalten werden sollten. Gründe hierfür wurden schon in den Kapiteln 5.2 und 6.2 bezüglich der Vernetzung eruiert.

6.3.3 Instandhaltung als Interpretation der Hierarchie der Tunnelinfrastruktur

In Analogie zur Untersuchung der Brückeninfrastruktur in 6.3.2 werden im Folgenden die Tunnelbauwerke und deren Funktionseinheiten untersucht. Die folgende Kritikalitätsmatrix ergibt sich auf Basis der wirtschaftlichen Leistung des Verkehrs, der durch den Tunnel geführt wird, auf der einen sowie der spezifischen Einflüsse der Funktionseinheiten der Tunnel auf der anderen Seite:

	Funktionseinheiten																		
	FE 6	FE 14	FE 13	FE 15	FE 17	FE 7	FE 16	FE 12	FE 5	FE 2	FE 3	FE 4	FE 9	FE 8	FE 1	FE 19	FE 18	FE 11	FE 10
2	0,7234	0,7330	0,7357	0,7601	0,7692	0,7759	0,7786	0,7844	0,8003	0,8156	0,8459	0,8474	0,8555	0,8608	0,9704	0,9783	0,9813	0,9995	1,0000
99	0,6036	0,6151	0,6183	0,6471	0,6578	0,6655	0,6687	0,6755	0,6939	0,7115	0,7460	0,7478	0,7569	0,7628	0,8847	0,8934	0,8967	0,9165	0,9171
3	0,5948	0,6064	0,6097	0,6390	0,6497	0,6576	0,6608	0,6676	0,6862	0,7041	0,7389	0,7407	0,7499	0,7559	0,8787	0,8875	0,8908	0,9107	0,9113
5	0,5472	0,5598	0,5634	0,5949	0,6064	0,6148	0,6182	0,6255	0,6454	0,6643	0,7011	0,7030	0,7127	0,7190	0,8472	0,8563	0,8597	0,8804	0,8809
9	0,5302	0,5432	0,5469	0,5793	0,5911	0,5998	0,6033	0,6108	0,6311	0,6504	0,6879	0,6899	0,6997	0,7062	0,8363	0,8455	0,8490	0,8699	0,8705
61	0,4864	0,5006	0,5045	0,5395	0,5522	0,5614	0,5651	0,5732	0,5948	0,6152	0,6548	0,6568	0,6671	0,6739	0,8093	0,8188	0,8223	0,8439	0,8445
40	0,4848	0,4990	0,5030	0,5380	0,5507	0,5600	0,5637	0,5718	0,5934	0,6139	0,6536	0,6556	0,6660	0,6728	0,8083	0,8178	0,8214	0,8430	0,8436
57	0,4810	0,4953	0,4993	0,5346	0,5474	0,5567	0,5605	0,5685	0,5903	0,6109	0,6507	0,6528	0,6632	0,6700	0,8060	0,8155	0,8191	0,8408	0,8414
67	0,4794	0,4938	0,4978	0,5332	0,5460	0,5554	0,5591	0,5672	0,5890	0,6097	0,6496	0,6516	0,6621	0,6689	0,8051	0,8146	0,8182	0,8399	0,8405
42	0,4677	0,4824	0,4865	0,5227	0,5358	0,5453	0,5491	0,5574	0,5795	0,6005	0,6410	0,6431	0,6536	0,6606	0,7982	0,8078	0,8114	0,8333	0,8339
10	0,4590	0,4739	0,4782	0,5149	0,5282	0,5378	0,5417	0,5501	0,5725	0,5938	0,6347	0,6368	0,6474	0,6544	0,7931	0,8028	0,8064	0,8284	0,8290
4	0,4543	0,4694	0,4736	0,5107	0,5241	0,5338	0,5377	0,5461	0,5688	0,5901	0,6313	0,6334	0,6441	0,6511	0,7904	0,8001	0,8037	0,8258	0,8264
81	0,4447	0,4601	0,4645	0,5022	0,5158	0,5257	0,5297	0,5382	0,5612	0,5828	0,6244	0,6266	0,6374	0,6445	0,7849	0,7947	0,7984	0,8206	0,8212
1	0,4141	0,4307	0,4353	0,4754	0,4897	0,5001	0,5043	0,5132	0,5372	0,5598	0,6030	0,6052	0,6164	0,6238	0,7680	0,7780	0,7818	0,8044	0,8051
8	0,4063	0,4231	0,4278	0,4685	0,4831	0,4936	0,4979	0,5069	0,5312	0,5541	0,5977	0,5999	0,6112	0,6186	0,7638	0,7738	0,7776	0,8004	0,8011
6	0,4048	0,4217	0,4265	0,4673	0,4819	0,4924	0,4967	0,5058	0,5301	0,5530	0,5967	0,5989	0,6102	0,6177	0,7630	0,7731	0,7769	0,7997	0,8003
7	0,4015	0,4185	0,4233	0,4644	0,4790	0,4897	0,4939	0,5031	0,5276	0,5505	0,5944	0,5966	0,6080	0,6154	0,7612	0,7713	0,7751	0,7980	0,7986
45	0,3979	0,4150	0,4198	0,4612	0,4760	0,4867	0,4910	0,5002	0,5248	0,5479	0,5920	0,5942	0,6056	0,6131	0,7593	0,7695	0,7733	0,7962	0,7968
30	0,3973	0,4145	0,4193	0,4607	0,4755	0,4862	0,4905	0,4997	0,5244	0,5475	0,5916	0,5938	0,6052	0,6127	0,7590	0,7692	0,7730	0,7959	0,7965
92	0,3865	0,4042	0,4091	0,4515	0,4666	0,4775	0,4819	0,4912	0,5163	0,5397	0,5844	0,5867	0,5982	0,6058	0,7535	0,7637	0,7675	0,7906	0,7912
14	0,3809	0,3988	0,4038	0,4467	0,4619	0,4729	0,4773	0,4868	0,5120	0,5357	0,5807	0,5830	0,5946	0,6022	0,7506	0,7608	0,7647	0,7878	0,7885
46	0,3658	0,3844	0,3895	0,4339	0,4495	0,4609	0,4654	0,4751	0,5009	0,5251	0,5709	0,5732	0,5850	0,5928	0,7430	0,7534	0,7572	0,7806	0,7813
44	0,3606	0,3795	0,3847	0,4295	0,4453	0,4568	0,4613	0,4711	0,4972	0,5215	0,5676	0,5700	0,5818	0,5896	0,7405	0,7509	0,7548	0,7782	0,7789
60	0,3582	0,3772	0,3824	0,4275	0,4434	0,4549	0,4594	0,4693	0,4954	0,5198	0,5661	0,5684	0,5803	0,5881	0,7393	0,7497	0,7536	0,7771	0,7778
59	0,3404	0,3603	0,3658	0,4127	0,4291	0,4410	0,4457	0,4558	0,4827	0,5077	0,5550	0,5574	0,5695	0,5775	0,7309	0,7414	0,7453	0,7691	0,7697
52	0,3397	0,3597	0,3652	0,4121	0,4286	0,4405	0,4452	0,4553	0,4822	0,5073	0,5545	0,5570	0,5691	0,5770	0,7305	0,7411	0,7450	0,7688	0,7694
96	0,3351	0,3554	0,3610	0,4084	0,4250	0,4370	0,4417	0,4519	0,4790	0,5042	0,5518	0,5542	0,5664	0,5744	0,7284	0,7390	0,7429	0,7668	0,7674
72	0,3336	0,3539	0,3595	0,4071	0,4238	0,4358	0,4406	0,4508	0,4779	0,5032	0,5508	0,5533	0,5655	0,5735	0,7277	0,7383	0,7423	0,7661	0,7668
93	0,3298	0,3504	0,3560	0,4041	0,4208	0,4329	0,4377	0,4480	0,4753	0,5007	0,5486	0,5510	0,5633	0,5713	0,7260	0,7366	0,7406	0,7645	0,7651
48	0,3211	0,3421	0,3479	0,3969	0,4140	0,4263	0,4311	0,4416	0,4693	0,4950	0,5433	0,5458	0,5582	0,5663	0,7221	0,7327	0,7367	0,7607	0,7614
24	0,3131	0,3347	0,3406	0,3905	0,4079	0,4203	0,4253	0,4358	0,4639	0,4899	0,5387	0,5412	0,5537	0,5618	0,7186	0,7293	0,7333	0,7574	0,7581
38	0,3023	0,3246	0,3307	0,3819	0,3996	0,4123	0,4174	0,4281	0,4567	0,4830	0,5325	0,5350	0,5476	0,5559	0,7139	0,7247	0,7287	0,7530	0,7537
27	0,2938	0,3167	0,3229	0,3752	0,3932	0,4061	0,4112	0,4222	0,4511	0,4777	0,5277	0,5302	0,5430	0,5513	0,7104	0,7212	0,7252	0,7496	0,7503
66	0,2918	0,3148	0,3211	0,3737	0,3917	0,4047	0,4098	0,4208	0,4498	0,4765	0,5266	0,5291	0,5419	0,5502	0,7096	0,7204	0,7244	0,7489	0,7495
73	0,2917	0,3147	0,3210	0,3735	0,3916	0,4046	0,4097	0,4207	0,4497	0,4764	0,5265	0,5290	0,5418	0,5502	0,7095	0,7203	0,7244	0,7488	0,7495
94	0,2837	0,3074	0,3138	0,3674	0,3857	0,3989	0,4041	0,4152	0,4446	0,4716	0,5221	0,5247	0,5376	0,5460	0,7063	0,7171	0,7212	0,7457	0,7464
63	0,2826	0,3063	0,3128	0,3665	0,3849	0,3981	0,4033	0,4144	0,4438	0,4709	0,5215	0,5241	0,5370	0,5454	0,7058	0,7167	0,7208	0,7453	0,7460
65	0,2742	0,2986	0,3052	0,3601	0,3788	0,3922	0,3975	0,4088	0,4386	0,4659	0,5170	0,5196	0,5326	0,5411	0,7025	0,7134	0,7175	0,7422	0,7429
39	0,2742	0,2985	0,3052	0,3600	0,3788	0,3921	0,3974	0,4087	0,4385	0,4659	0,5170	0,5196	0,5326	0,5411	0,7025	0,7134	0,7175	0,7422	0,7428
70	0,2576	0,2834	0,2904	0,3476	0,3669	0,3807	0,3862	0,3978	0,4283	0,4564	0,5084	0,5110	0,5242	0,5329	0,6962	0,7072	0,7113	0,7362	0,7369
650	0,2516	0,2780	0,2851	0,3432	0,3628	0,3767	0,3822	0,3940	0,4248	0,4530	0,5054	0,5081	0,5213	0,5300	0,6940	0,7050	0,7092	0,7341	0,7348
620	0,2448	0,2718	0,2791	0,3382	0,3581	0,3722	0,3778	0,3897	0,4208	0,4493	0,5020	0,5047	0,5181	0,5268	0,6916	0,7026	0,7068	0,7318	0,7325
33	0,2447	0,2717	0,2790	0,3381	0,3580	0,3721	0,3777	0,3896	0,4207	0,4492	0,5020	0,5047	0,5180	0,5268	0,6915	0,7026	0,7068	0,7318	0,7325
23	0,2314	0,2599	0,2674	0,3287	0,3491	0,3636	0,3693	0,3814	0,4132	0,4421	0,4957	0,4984	0,5119	0,5207	0,6869	0,6981	0,7023	0,7275	0,7282
623	0,2303	0,2589	0,2665	0,3279	0,3484	0,3629	0,3686	0,3807	0,4125	0,4416	0,4952	0,4979	0,5114	0,5202	0,6866	0,6977	0,7019	0,7271	0,7278
20	0,2214	0,2510	0,2588	0,3217	0,3425	0,3573	0,3631	0,3754	0,4076	0,4370	0,4911	0,4938	0,5075	0,5164	0,6836	0,6948	0,6990	0,7243	0,7250
31	0,2169	0,2470	0,2549	0,3186	0,3396	0,3545	0,3603	0,3727	0,4052	0,4347	0,4890	0,4918	0,5055	0,5144	0,6822	0,6934	0,6976	0,7229	0,7237
19	0,2147	0,2451	0,2531	0,3171	0,3382	0,3531	0,3590	0,3715	0,4040	0,4336	0,4881	0,4908	0,5046	0,5135	0,6815	0,6927	0,6969	0,7223	0,7230
71	0,2039	0,2357	0,2440	0,3099	0,3315	0,3467	0,3527	0,3654	0,3984	0,4284	0,4834	0,4862	0,5001	0,5091	0,6782	0,6895	0,6937	0,7192	0,7199
62	0,1768	0,2126	0,2218	0,2928	0,3155	0,3315	0,3377	0,3509	0,3852	0,4161	0,4726	0,4755	0,4896	0,4988	0,6705	0,6819	0,6862	0,7120	0,7127

Abbildung 6-46: Kritikalitätsmatrix der Tunnel an BAB (mind. 5 Zählstellen)

Basierend auf der Kritikalitätsmatrix wird nun wie bisher die hierarchische Ordnung nach den Grenzwerten gebildet. Es werden die entsprechenden der vereinbarten Konventionen festgelegten Grenzwerte gebildet. Das Maximum weist dabei, wie definiert, den Wert 1,00 auf. Daneben ergeben sich ein 0,75-Quantil von 0,7095, ein 0,50-Quantil von 0,5414, ein 0,25-Quantil von 0,4316 sowie ein Minimum von 0,1768. Die Grenzen entsprechen diesen fünf Werten und sollen die Instandhaltungsstrategien abgrenzen. Das Resultat der Anwendung ist die folgende Abbildung, den Instandhaltungsstrategien sind entsprechende Farben zugeordnet.

		Funktionseinheiten																		
		FE 6	FE 14	FE 13	FE 15	FE 17	FE 7	FE 16	FE 12	FE 5	FE 2	FE 3	FE 4	FE 9	FE 8	FE 1	FE 19	FE 18	FE 11	FE 10
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,7234	0,7330	0,7357	0,7601	0,7692	0,7759	0,7786	0,7844	0,8003	0,8156	0,8459	0,8474	0,8555	0,8608	0,9704	0,9783	0,9813	0,9995	1,0000
	99	0,6036	0,6151	0,6183	0,6471	0,6578	0,6655	0,6687	0,6755	0,6939	0,7115	0,7460	0,7478	0,7569	0,7628	0,8847	0,8934	0,8967	0,9165	0,9171
	3	0,5948	0,6064	0,6097	0,6390	0,6497	0,6576	0,6608	0,6676	0,6862	0,7041	0,7389	0,7407	0,7499	0,7559	0,8787	0,8875	0,8908	0,9107	0,9113
	5	0,5472	0,5598	0,5634	0,5949	0,6064	0,6148	0,6182	0,6255	0,6454	0,6643	0,7011	0,7030	0,7127	0,7190	0,8472	0,8563	0,8597	0,8804	0,8809
	9	0,5302	0,5432	0,5469	0,5793	0,5911	0,5998	0,6033	0,6108	0,6311	0,6504	0,6879	0,6899	0,6997	0,7062	0,8363	0,8455	0,8490	0,8699	0,8705
	61	0,4864	0,5006	0,5045	0,5395	0,5522	0,5614	0,5651	0,5732	0,5948	0,6152	0,6548	0,6568	0,6671	0,6739	0,8093	0,8188	0,8223	0,8439	0,8445
	40	0,4848	0,4990	0,5030	0,5380	0,5507	0,5600	0,5637	0,5718	0,5934	0,6139	0,6536	0,6556	0,6660	0,6728	0,8083	0,8178	0,8214	0,8430	0,8436
	57	0,4810	0,4953	0,4993	0,5346	0,5474	0,5567	0,5605	0,5685	0,5903	0,6109	0,6507	0,6528	0,6632	0,6700	0,8060	0,8155	0,8191	0,8408	0,8414
	67	0,4794	0,4938	0,4978	0,5332	0,5460	0,5554	0,5591	0,5672	0,5890	0,6097	0,6496	0,6516	0,6621	0,6689	0,8051	0,8146	0,8182	0,8399	0,8405
	42	0,4677	0,4824	0,4865	0,5227	0,5358	0,5453	0,5491	0,5574	0,5795	0,6005	0,6410	0,6431	0,6536	0,6606	0,7982	0,8078	0,8114	0,8333	0,8339
	10	0,4590	0,4739	0,4782	0,5149	0,5282	0,5378	0,5417	0,5501	0,5725	0,5938	0,6347	0,6368	0,6474	0,6544	0,7931	0,8028	0,8064	0,8284	0,8290
	4	0,4543	0,4694	0,4736	0,5107	0,5241	0,5338	0,5377	0,5461	0,5688	0,5901	0,6313	0,6334	0,6441	0,6511	0,7904	0,8001	0,8037	0,8258	0,8264
	81	0,4447	0,4601	0,4645	0,5022	0,5158	0,5257	0,5297	0,5382	0,5612	0,5828	0,6244	0,6266	0,6374	0,6445	0,7849	0,7947	0,7984	0,8206	0,8212
	1	0,4141	0,4307	0,4353	0,4754	0,4897	0,5001	0,5043	0,5132	0,5372	0,5598	0,6030	0,6052	0,6164	0,6238	0,7680	0,7780	0,7818	0,8044	0,8051
	8	0,4063	0,4231	0,4278	0,4685	0,4831	0,4936	0,4979	0,5069	0,5312	0,5541	0,5977	0,5999	0,6112	0,6186	0,7638	0,7738	0,7776	0,8004	0,8011
	6	0,4048	0,4217	0,4265	0,4673	0,4819	0,4924	0,4967	0,5058	0,5301	0,5530	0,5967	0,5989	0,6102	0,6177	0,7630	0,7731	0,7769	0,7997	0,8003
	7	0,4015	0,4185	0,4233	0,4644	0,4790	0,4897	0,4939	0,5031	0,5276	0,5505	0,5944	0,5966	0,6080	0,6154	0,7612	0,7713	0,7751	0,7980	0,7986
	45	0,3979	0,4150	0,4198	0,4612	0,4760	0,4867	0,4910	0,5002	0,5248	0,5479	0,5920	0,5942	0,6056	0,6131	0,7593	0,7695	0,7733	0,7962	0,7968
	30	0,3973	0,4145	0,4193	0,4607	0,4755	0,4862	0,4905	0,4997	0,5244	0,5475	0,5916	0,5938	0,6052	0,6127	0,7590	0,7692	0,7730	0,7959	0,7965
	92	0,3865	0,4042	0,4091	0,4515	0,4666	0,4775	0,4819	0,4912	0,5163	0,5397	0,5844	0,5867	0,5982	0,6058	0,7535	0,7637	0,7675	0,7906	0,7912
	14	0,3809	0,3988	0,4038	0,4467	0,4619	0,4729	0,4773	0,4868	0,5120	0,5357	0,5807	0,5830	0,5946	0,6022	0,7506	0,7608	0,7647	0,7878	0,7885
	46	0,3658	0,3844	0,3895	0,4339	0,4495	0,4609	0,4654	0,4751	0,5009	0,5251	0,5709	0,5732	0,5850	0,5928	0,7430	0,7534	0,7572	0,7806	0,7813
	44	0,3606	0,3795	0,3847	0,4295	0,4453	0,4568	0,4613	0,4711	0,4972	0,5215	0,5676	0,5700	0,5818	0,5896	0,7405	0,7509	0,7548	0,7782	0,7789
	60	0,3582	0,3772	0,3824	0,4275	0,4434	0,4549	0,4594	0,4693	0,4954	0,5198	0,5661	0,5684	0,5803	0,5881	0,7393	0,7497	0,7536	0,7771	0,7778
	59	0,3404	0,3603	0,3658	0,4127	0,4291	0,4410	0,4457	0,4558	0,4827	0,5077	0,5550	0,5574	0,5695	0,5775	0,7309	0,7414	0,7453	0,7691	0,7697
	52	0,3397	0,3597	0,3652	0,4121	0,4286	0,4405	0,4452	0,4553	0,4822	0,5073	0,5545	0,5570	0,5691	0,5770	0,7305	0,7411	0,7450	0,7688	0,7694
	96	0,3351	0,3554	0,3610	0,4084	0,4250	0,4370	0,4417	0,4519	0,4790	0,5042	0,5518	0,5542	0,5664	0,5744	0,7284	0,7390	0,7429	0,7668	0,7674
	72	0,3336	0,3539	0,3595	0,4071	0,4238	0,4358	0,4406	0,4508	0,4779	0,5032	0,5508	0,5533	0,5655	0,5735	0,7277	0,7383	0,7423	0,7661	0,7668
	93	0,3298	0,3504	0,3560	0,4041	0,4208	0,4329	0,4377	0,4480	0,4753	0,5007	0,5486	0,5510	0,5633	0,5713	0,7260	0,7366	0,7406	0,7645	0,7651
	48	0,3211	0,3421	0,3479	0,3969	0,4140	0,4263	0,4311	0,4416	0,4693	0,4950	0,5433	0,5458	0,5582	0,5663	0,7221	0,7327	0,7367	0,7607	0,7614
	24	0,3131	0,3347	0,3406	0,3905	0,4079	0,4203	0,4253	0,4358	0,4639	0,4899	0,5387	0,5412	0,5537	0,5618	0,7186	0,7293	0,7333	0,7574	0,7581
	38	0,3023	0,3246	0,3307	0,3819	0,3996	0,4123	0,4174	0,4281	0,4567	0,4830	0,5325	0,5350	0,5476	0,5559	0,7139	0,7247	0,7287	0,7530	0,7537
	27	0,2938	0,3167	0,3229	0,3752	0,3932	0,4061	0,4112	0,4222	0,4511	0,4777	0,5277	0,5302	0,5430	0,5513	0,7104	0,7212	0,7252	0,7496	0,7503
	66	0,2918	0,3148	0,3211	0,3737	0,3917	0,4047	0,4098	0,4208	0,4498	0,4765	0,5266	0,5291	0,5419	0,5502	0,7096	0,7204	0,7244	0,7489	0,7495
	73	0,2917	0,3147	0,3210	0,3735	0,3916	0,4046	0,4097	0,4207	0,4497	0,4764	0,5265	0,5290	0,5418	0,5502	0,7095	0,7203	0,7244	0,7488	0,7495
	94	0,2837	0,3074	0,3138	0,3674	0,3857	0,3989	0,4041	0,4152	0,4446	0,4716	0,5221	0,5247	0,5376	0,5460	0,7063	0,7171	0,7212	0,7457	0,7464
	63	0,2826	0,3063	0,3128	0,3665	0,3849	0,3981	0,4033	0,4144	0,4438	0,4709	0,5215	0,5241	0,5370	0,5454	0,7058	0,7167	0,7208	0,7453	0,7460
	65	0,2742	0,2986	0,3052	0,3601	0,3788	0,3922	0,3975	0,4088	0,4385	0,4659	0,5170	0,5196	0,5326	0,5411	0,7025	0,7134	0,7175	0,7422	0,7429
	39	0,2742	0,2985	0,3052	0,3600	0,3788	0,3921	0,3974	0,4087	0,4385	0,4659	0,5170	0,5196	0,5326	0,5411	0,7025	0,7134	0,7175	0,7422	0,7428
	70	0,2576	0,2834	0,2904	0,3476	0,3669	0,3807	0,3862	0,3978	0,4283	0,4564	0,5084	0,5110	0,5242	0,5329	0,6962	0,7072	0,7113	0,7362	0,7369
	650	0,2516	0,2790	0,2851	0,3432	0,3628	0,3767	0,3822	0,3940	0,4248	0,4530	0,5054	0,5081	0,5213	0,5300	0,6940	0,7050	0,7092	0,7341	0,7348
	620	0,2448	0,2718	0,2791	0,3382	0,3581	0,3722	0,3778	0,3897	0,4208	0,4493	0,5020	0,5047	0,5181	0,5268	0,6916	0,7026	0,7068	0,7318	0,7325
	33	0,2447	0,2717	0,2790	0,3381	0,3580	0,3721	0,3777	0,3896	0,4207	0,4492	0,5020	0,5047	0,5180	0,5268	0,6915	0,7026	0,7068	0,7318	0,7325
	23	0,2314	0,2599	0,2674	0,3287	0,3491	0,3636	0,3693	0,3814	0,4132	0,4421	0,4957	0,4984	0,5119	0,5207	0,6869	0,6981	0,7023	0,7275	0,7282
	623	0,2303	0,2589	0,2665	0,3279	0,3484	0,3629	0,3686	0,3807	0,4125	0,4416	0,4952	0,4979	0,5114	0,5202	0,6866	0,6977	0,7019	0,7271	0,7278
	20	0,2214	0,2510	0,2588	0,3217	0,3425	0,3573	0,3631	0,3754	0,4076	0,4370	0,4911	0,4938	0,5075	0,5164	0,6836	0,6948	0,6990	0,7243	0,7250
	31	0,2169	0,2470	0,2549	0,3186	0,3396	0,3545	0,3603	0,3727	0,4052	0,4347	0,4890	0,4918	0,5055	0,5144	0,6822	0,6934	0,6976	0,7229	0,7237
	19	0,2147	0,2451	0,2531	0,3171	0,3382	0,3531	0,3590	0,3715	0,4040	0,4336	0,4881	0,4908	0,5046	0,5135	0,6815	0,6927	0,6969	0,7223	0,7230
	71	0,2039	0,2357	0,2440	0,3099	0,3315	0,3467	0,3527	0,3654	0,3984	0,4284	0,4834	0,4862	0,5001	0,5091	0,6782	0,6895	0,6937	0,7192	0,7199
	62	0,1768	0,2126	0,2218	0,2928	0,3155	0,3315	0,3377	0,3509	0,3852	0,4161	0,4726	0,4755	0,4896	0,4988	0,6705	0,6819	0,6862	0,7120	0,7127

Abbildung 6-47: Darstellung der empfohlenen Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität

Wie bereits bei der Betrachtung der Straßeninfrastruktur, erfahren auch die Tunnel der BAB 2 ein solch hohes Maß an Kritikalität, dass die Funktionseinheiten für diese keine Rolle in Hinsicht auf die Instandhaltungsstrategie spielen. Das gleiche gilt umgekehrt für die beiden Funktionseinheiten mit der höchsten Kritikalität, den baulichen Brandschutz sowie die Flucht- und Rettungseinrichtungen. Beide sind für die Tunnel, unabhängig von der BAB, der sie angehören, von so großer Bedeutung, dass sie vorausbestimmt instandgehalten werden sollten. Darüber hinaus sind auch die weiteren Funktionseinheiten des Brandschutzes, die Brandmeldeanlagen sowie die Löscheinrichtungen von so hoher Bedeutung, dass sie mindestens zustandsbestimmt instandgehalten werden müssen.

6.3.4 Überlagerung der Bauwerke zu einem Verkehrsträger

Wird nun ein Ausschnitt eines Netzes betrachtet, bspw. eine Straße oder ein Straßenabschnitt, so besteht dieser aus allen drei vorgestellten Typen. Sowohl dem Straßenkörper als auch Tunneln sowie Brücken. Das führt zu der Frage nach der Überlagerbarkeit der drei Interpretationen.

Diese wird durch zwei Umstände gegeben. Zum einen sind die möglichen Folgen für den Funktionsbetrieb für Ausfälle von Funktionseinheiten, die vier vorgestellten Fälle, für alle drei Typen

identisch. Zum anderen wird von der Annahme ausgegangen, dass alle drei Typen als gleichwertig angesehen werden können. Das heißt der Maximalwert auf dem Kritikalitätsmaß ist je 1,00.

Zudem ist das Vorgehen analog. Die Hierarchie auf Basis der Leistung wird für alle drei Typen gleichermaßen verwendet, sodass wenigstens eine Dimension exakt identisch ist. Für eine ordinale Beziehung reicht dies bereits aus.

6.4 Ableitung von gemischten Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität

Mit der in Kapitel 5 hergeleiteten Methodik wurde ein Modell entwickelt, welches in der Lage sein soll, eine wirtschaftliche Instandhaltung auf Basis sozioökonomischer und einzelwirtschaftlicher Aspekte zu erzeugen. Dabei wurde der in Kapitel 1.3 gesetzten Methodik gefolgt. Nun soll das Modell in solcher Hinsicht überprüft werden, dass die Vorhersagen und Ergebnisse, die es erzeugt, logisch und in sich konsistent sind. Dazu wird der Praxisbezug in Hinsicht auf die im Modell verknüpften Bereiche, die wirtschaftliche Bedeutung, die Vernetzung der Funktionseinheiten sowie die Instandhaltung an konkreten Beispielen betrachtet.

In diesen Beispielen soll vor allem auf die bereits getätigte Schlussfolgerung eingegangen werden, dass effiziente Instandhaltung nicht zwingend als eine Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage bzw. das gesamte Objekt verstanden werden sollte, sondern als eine Mischung aus der jeweils effizienten Strategie je Betrachtungseinheit (und damit Funktionseinheit), deren Summe erst die Anlage bzw. das Objekt darstellt.

Dabei soll zum einen auf die Kritikalität sowie deren Parameter, das Maß und die Grenzen eingegangen werden, zum anderen aber auch die Ausfallbedeutung expliziter Objekte und Maßnahmen betrachtet werden.

Für die Ausfallbedeutung gilt dabei, dass es sich per se um keine neuartige Betrachtungsweise handelt, wenngleich die Umsetzung fernab der Kosten-Nutzen-Analyse als Planungsinstrument zur Untersuchung der Realisierungsentscheidung in der Praxis selten angewandt wird. Dennoch sind solche Untersuchungen in kommerziellen Kreisen im Rahmen von Studien und Gutachten vorhanden.

Mit den einzelwirtschaftlichen Aspekten verknüpft, wurde dagegen die gesamtwirtschaftliche Bedeutung betrachtet, wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht und bestimmt wurde. Damit bedient sie die im Vordergrund stehende Forderung nach einem Entscheidungskriterium zur Zuweisung der finanziellen Mittel. Und zwar vor einem Ausfallereignis bzw. dem *res defecto*, womit der *Status quo ante rei* betrachtet werden kann und soll.

Eine vierstufige Darstellung der Handlungsempfehlungen hinsichtlich der untersuchten Parameter zeigt die folgende Tabelle. Sie enthält exemplarisch sechs verschiedene Bundesautobahnen und stellt die Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit von der Kritikalität dar. Die Darstellung bezieht sich dabei auf die Funktionseinheiten. Mit abnehmender mittlerer Kritikalität über die Funktionseinheiten eines Objektes ergibt sich, wie zu erwarten, ein Übergang der Funktionseinheiten von links nach rechts.

		Handlungsempfehlung			
		1 Vorausbestimmte Instandhaltung	2 Zustandsbestimmte Instandhaltung	3 Sofortige Instandhaltung	4 Aufgeschobene Instandhaltung
Bundesautobahn	3	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4 Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2 Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6	Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7		
	5	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4 Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2	Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7		
	1	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4	Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2 Funktionseinheit 9	Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7	
	7	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4	Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2	Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12	Funktionseinheit 7
	60	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5	Funktionseinheit 4 Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2	Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6	Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7
	62	Funktionseinheit 1	Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4	Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2	Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7

Tabelle 6-11: Exemplarische Darstellung der Handlungsempfehlung für die Bundesautobahnen 3, 5, 1, 7, 60, 62

Die hier gezeigten 6 Bundesautobahnen stehen dabei stellvertretend für sämtliche Bundesautobahnen sowie die dazu gehörenden Brücken und Tunnel. Dabei unterstehen die

Strategien in der Tabelle einer statischen Betrachtung. Die tatsächliche Verteilung der Funktionseinheiten ist in der Realität entweder vom Budget abhängig oder von den vom Management vorgegebenen Grenzen. Wirtschaftlich betrachtet, handelt es sich dabei um das Maximalprinzip, da der Nutzen vor dem Hintergrund der gegebenen Limitierung (Budget oder Grenzen), maximiert werden soll.

Das Maximalprinzip, bei dem der Nutzen der Instandhaltung bei gegebenen finanziellen Mitteln maximiert werden soll, wird in Kapitel 6.4.1.2 angewendet. Das Maximalprinzip, bei dem der Nutzen der Instandhaltung bei durch das Management gegebenen Instandhaltungsgrenzen maximiert werden soll, wird in Kapitel 6.4.1.1 angewendet.

6.4.1 Resultierende Strategien im Umfeld differenzierter Kritikalität

Durch das Zusammenspiel von Kritikalität auf der einen Seite und Kosten auf der anderen Seite kann das Optimierungsproblem nicht allein aus volks- oder betriebswirtschaftlicher Sicht gelöst werden. Wie bereits beschrieben, würde aus der Sphäre der Betriebswirtschaft das Investitionsvolumen möglichst minimiert werden, aus der Sphäre der Volkswirtschaft dagegen maximiert, mit bzw. gerade wegen der Auswirkungen auf den Nutzen.

In den folgenden Teilkapiteln sollen nun verschiedene Beispiele aufgeführt werden, um die Verwendung der Methodik zu veranschaulichen und kritisch zu betrachten. Zudem soll aufgezeigt werden, wie eine praktische Anwendung sinnvoll möglich ist.

6.4.1.1 Genese einer Instandhaltungsstrategie unter Berücksichtigung gegebener Grenzen

Wenn für die Grenzen des Kritikalitätsmaßes zur Abgrenzung der Instandhaltungsstrategien je Funktionseinheit ein bestimmter Wert gegeben ist, so lässt sich die resultierende Instandhaltungsstrategie als Mischstrategie (bzw. Strategienmix) ableiten. Im Rahmen eines Top-Down-Ansatzes würden die Grenzen durch das Management bzw. die Verwaltung vorgegeben. Die daraus resultierenden notwendigen finanziellen Mittel sind dann variabel und können bestimmt werden.

Im Folgenden sei ein fiktives Beispiel gegeben, welches 9 Funktionseinheiten umfasst. Jede Funktionseinheit umfasst eine Anzahl von Bauteilen, jedem Bauteil sind Lebensdauern und Instandhaltungskosten gegeben, in Abhängigkeit von den Instandhaltungsstrategien. Jeder Funktionseinheit ist ein Kritikalitätsmaß zugeordnet. Es existieren 3 Grenzen zur Differenzierung der Instandhaltungsstrategien vor den Funktionseinheiten.

Für eine Anzahl von $m = 9$ Funktionseinheiten k_i gilt mit $n = m - 1$ die folgende allgemeine algorithmische Darstellung zur Zuordnung der korrekten Instandhaltungsstrategie S_i bei gegebenen Grenzen g_j :

```

For i = 0 to n do
  If  $k_i \geq g_1$ 
  Then  $S_i = S_1$ 
  Else
    If  $k_i \geq g_2$ 
    Then  $S_i = S_2$ 
    Else
      If  $k_i \geq g_3$ 
      Then  $S_i = S_3$ 
      Else
         $S_i = S_4$ 
      End
    End
  End
End.
    
```

Formel 6-22: Algorithmus zur Strategiezuzuordnung in Abhängigkeit von den Kritikalitätsgrenzen

Mit diesem Algorithmus lässt sich nun die Mischstrategie ableiten. Über einen Zeitraum von 100 Jahren ergibt sich der Verlauf entsprechend der folgenden Abbildung. Daneben sind jeweils die Verläufe eingezeichnet, die sich aus dem strikten Festhalten an nur eine Strategie ergeben.

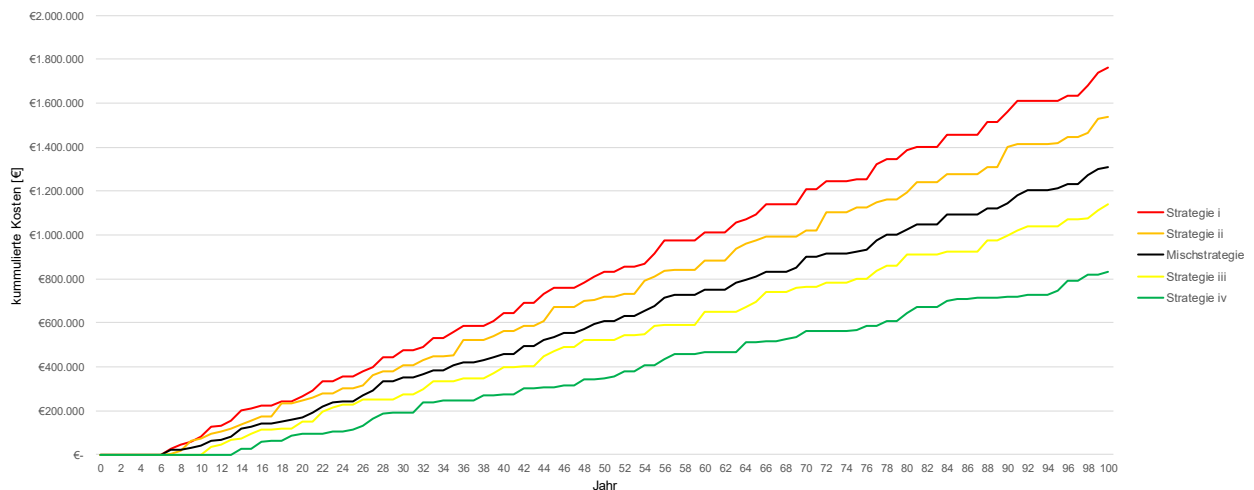


Abbildung 6-48: Resultierende Mischstrategie bei gegebenen Grenzwerten

Wie zu erkennen ist, befindet sich die Mischstrategie die längste Zeit des Betrachtungszeitraumes zwischen der Strategie ii und iii. Sie ist demzufolge relativ mittig angesiedelt. Trotz des ähnlichen Bildes der insgesamt fünf Verläufe, ist keine strikte Parallelität erkennbar, wenngleich der Trend eindeutig ist. In der folgenden Tabelle sind die auf Basis des Algorithmus gewählten Strategien je Funktionseinheit dargestellt sowie die durchschnittlichen jährlichen Kosten je Funktionseinheit.

	Kosten, Ø/Jahr	Strategie
Funktionseinheit A	981,45 €	Strategie iii
Funktionseinheit B	534,26 €	Strategie iv
Funktionseinheit C	2.554,10 €	Strategie i
Funktionseinheit D	3.524,84 €	Strategie i
Funktionseinheit E	841,38 €	Strategie iv
Funktionseinheit F	1.586,37 €	Strategie i
Funktionseinheit G	1.124,81 €	Strategie iv
Funktionseinheit H	1.799,86 €	Strategie iv
Funktionseinheit I	1.609,65 €	Strategie i

Tabelle 6-12: Gewählte Strategien in Abhängigkeit von Funktionseinheit und Kritikalitätsgrenze

Stellt man die Funktionseinheiten sowie die Strategien matrixförmig gegenüber, so lassen sich die Strategien vergleichen. Dabei zeigt sich, dass die resultierende Mischstrategie in diesem Beispiel eine Ersparnis von 19,58 % gegenüber der „besten“ Strategie, der vorausbestimmten Instandhaltung, hat. Gegenüber der zweitbesten beträgt der Vorteil 9,02 %. Gegenüber den weiteren Strategien hat die Mischstrategie dagegen einen monetären Nachteil in Höhe von 21,33 % bzw. 61,20 %.

Kosten, Ø/Jahr	Mischstrategie	Strategie i	Strategie ii	Strategie iii	Strategie iv
Funktionseinheit A	981,45 €	1.641,79 €	1.315,70 €	981,45 €	770,65 €
Funktionseinheit B	534,26 €	1.264,83 €	1.132,38 €	687,10 €	534,26 €
Funktionseinheit C	2.554,10 €	2.554,10 €	2.013,05 €	1.531,28 €	1.122,38 €
Funktionseinheit D	3.524,84 €	3.524,84 €	3.240,00 €	2.324,51 €	1.819,82 €
Funktionseinheit E	841,38 €	2.073,35 €	1.385,90 €	1.259,16 €	841,38 €
Funktionseinheit F	1.586,37 €	1.586,37 €	1.468,15 €	1.168,44 €	972,95 €
Funktionseinheit G	1.124,81 €	2.046,32 €	1.806,92 €	1.533,47 €	1.124,81 €
Funktionseinheit H	1.799,86 €	1.799,86 €	2.044,55 €	1.321,18 €	987,39 €
Funktionseinheit I	1.609,65 €	1.609,65 €	1.593,97 €	1.191,35 €	856,82 €
Summe	14.556,72 €	18.101,11 €	16.000,62 €	11.997,94 €	9.030,47 €
Vorteil Mischstrategie	0,00 %	19,58 %	9,02 %	-21,33 %	-61,20 %

Tabelle 6-13: Vergleich der Mischstrategie und der vier „klassischen“ Strategien

6.4.1.2 Genese von Grenzwerten unter Berücksichtigung gegebener Mittel

In einer Finanzierung wie sie in den oft politisch bestimmten Haushalten vereinbart wird, wird im Allgemeinen ein bestimmter Betrag für eine bestimmte Zeitspanne festgelegt. Das bedeutet, dass die finanziellen Mittel als gegeben angesehen werden können. Die Grenzen des Kritikalitätsmaßes können dagegen frei gewählt werden. Das sollte im Allgemeinen so geschehen, dass die Mittel möglichst vollständig aufgezehrt werden, solange mit Maximierung der Ausgaben (innerhalb des Verfügungsrahmens) eine Steigung des Nutzens erreicht wird. Im Rahmen eines Top-Down-Ansatzes würden die zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel durch das Management bzw. die

Verwaltung vorgegeben. Die daraus resultierenden Grenzen sind dann variabel und können bestimmt werden.

Dennoch ist es, da der Zusammenhang nicht als linear angesehen werden kann, sinnvoll, eine algorithmisch gestützte Optimierung anzustreben, da dem ökonomischen Prinzip folgend eine Aufzehrung der verfügbaren Mittel von 100 % nicht nutzenmaximierend sein muss und sogar schädigend sein kann.

Es wird weiterhin das fiktive Beispiel betrachtet, welches 9 Funktionseinheiten umfasst (vgl. 6.4.1.1). Jede Funktionseinheit umfasst eine Anzahl von Bauteilen, jedem Bauteil sind Lebensdauern und Instandhaltungskosten gegeben, in Abhängigkeit von den Instandhaltungsstrategien. Jeder Funktionseinheit ist ein Kritikalitätsmaß zugeordnet.

Für jede beliebige Menge gegebener finanzieller Mittel kann nun ein resultierender Strategiemix gefunden werden, der verschiedenen Nebenbedingungen genügt. Dabei ist der Strategiemix zu finden, der möglichst effektiv vor dem Hintergrund des Nutzens ist. Unter Berücksichtigung der Nebenbedingungen kann das Problem als nicht kontinuierliches Optimierungsproblem verstanden werden, welches mithilfe eines evolutionären Algorithmus genähert werden kann. Dabei ist davon auszugehen, dass es sich bei der Lösung nicht um die beste, jedoch um eine hinreichend genaue handelt.

Die Funktion, welche die Instandhaltungsstrategien den Funktionseinheiten in Abhängigkeit vom Kritikalitätsmaß unter Berücksichtigung der Grenzen zuordnet, soll als **Kritikalitätsgrenzfunktion** $f_k(\mathbf{x})$ bezeichnet werden. Jene Funktion, welche die Instandhaltungskosten des aus der Kritikalitätsgrenzfunktion abgeleiteten Strategiemix addiert, soll als **Kritikalitätsgrenzkostenfunktion** $f_{kg}(\mathbf{x})$ bezeichnet werden.

Die Kritikalitätsgrenzkostenfunktion addiert nun unter Berücksichtigung der Bedingungen die Kosten der optimalen Strategie jeder Funktionseinheit. Es gilt dementsprechend:

$$f_{kg}(x) = \sum_{i=1}^n KS_i^{opt}$$

Formel 6-23: Kritikalitätsgrenzkostenfunktion

Dabei entsprechen die Kosten der optimalen Strategie der Funktionseinheit selbst einer Funktion KS in Abhängigkeit von den Grenzen g_1, g_2, g_3 . Die Grenzwerte liegen jeweils im Intervall von 0 bis 1. Die Formel lässt sich erweitern zu:

$$f_{kg}(x) = \sum_{i=1}^n KS_i^{opt}(g) \text{ mit } g = \{g_1, g_2, g_3\}; \text{ f\"ur jedes } g_i = \{g \in \mathbb{R} \mid 0 \leq g \leq 1\}$$

Formel 6-24: Kritikalitatsgrenzkostenfunktion in Abhängigkeit von den Grenzen

Weiter ist die (Kosten-) Funktion KS die Verknüpfung aus der gewählten Strategie (in Abhängigkeit von g_i) und den dazugehörigen Kosten, womit gilt:

$$KS_i^{opt}(g) = K_i * S_i^{opt}(g)$$

Formel 6-25: Kostenfunktion der optimalen Strategie einer Funktionseinheit

Die Strategiewahl in Abhängigkeit von den Grenzen ist somit das entscheidende Kriterium für die Berechnung der Kritikalitätsgrenzen. Dabei ist jene Strategie optimal, deren Grenzwert sämtliche Nebenbedingungen erfüllt. Die Gruppe der Nebenbedingungen G wird definiert durch die Elemente $g_{NB,i}$. Es gilt:

$$S_i^{opt}(g) = S_i(g^{opt}) \text{ mit } g^{opt} \triangleleft \forall g_{NB,i} = G$$

Formel 6-26: Funktion der Strategiewahl in Abhängigkeit von den Grenzen

Als Nebenbedingungen lassen sich die Folgenden bestimmen. Aus der Forderung, die Grenzen sollen im Intervall zwischen 0 und 1 liegen, folgen, für positiv rationale Zahlen, $\{g \in \mathbb{R}_0^+ \mid 0 \leq g \leq 1\}$ die Nebenbedingungen I bis III:

$$\begin{aligned} I: g_1 &\leq 1 \\ II: g_2 &\leq 1 \\ III: g_3 &\leq 1 \end{aligned}$$

Formel 6-27: Nebenbedingungen I–III

Da die Grenzen 1 und 3 per definitionem als untere bzw. obere Schranken definiert sind und die Grenze 2 die mittlere Grenze darstellt, gelten als weitere Nebenbedingungen IV und V:

$$\begin{aligned} IV: g_1 &\leq g_2 \\ V: g_2 &\leq g_3 \end{aligned}$$

Formel 6-28: Nebenbedingungen IV–V

Ferner gilt für die untere Schranke, dass sie das Minimum der vorhandenen Kritikalitätsmaße der Funktionseinheiten nicht unterschreiten darf. Es gilt demzufolge VI:

$$VI: g_1 \geq \min(Krit_{FE})$$

Formel 6-29: Nebenbedingung VI

Dazu gilt allgemein, dass das Ergebnis der Kritikalitätsgrenzkostenfunktion maximal sein soll, jedoch den gegebenen Grenzwert nicht übersteigen darf. Somit gilt VII:

$$VII: f_{kg}(x) \leq KS_{grenz}$$

Formel 6-30: Nebenbedingung VII

Unter Berücksichtigung dieser Nebenbedingungen kann die Kritikalitätsgrenzfunktion $f_k(x)$ definiert werden als

$$f_k(x) = g_1 + g_2 + g_3$$

Formel 6-31: Kritikalitätsgrenzfunktion

Wobei die Kritikalitätsgrenzfunktion $f_k(x)$, unter Einhaltung der Nebenbedingungen, minimiert werden soll.

$$f_k(x) \stackrel{!}{=} \min!$$

Formel 6-32: Zieldefinition der Kritikalitätsgrenzfunktion

Die folgende Abbildung zeigt eine Näherung einer möglichen Lösung:

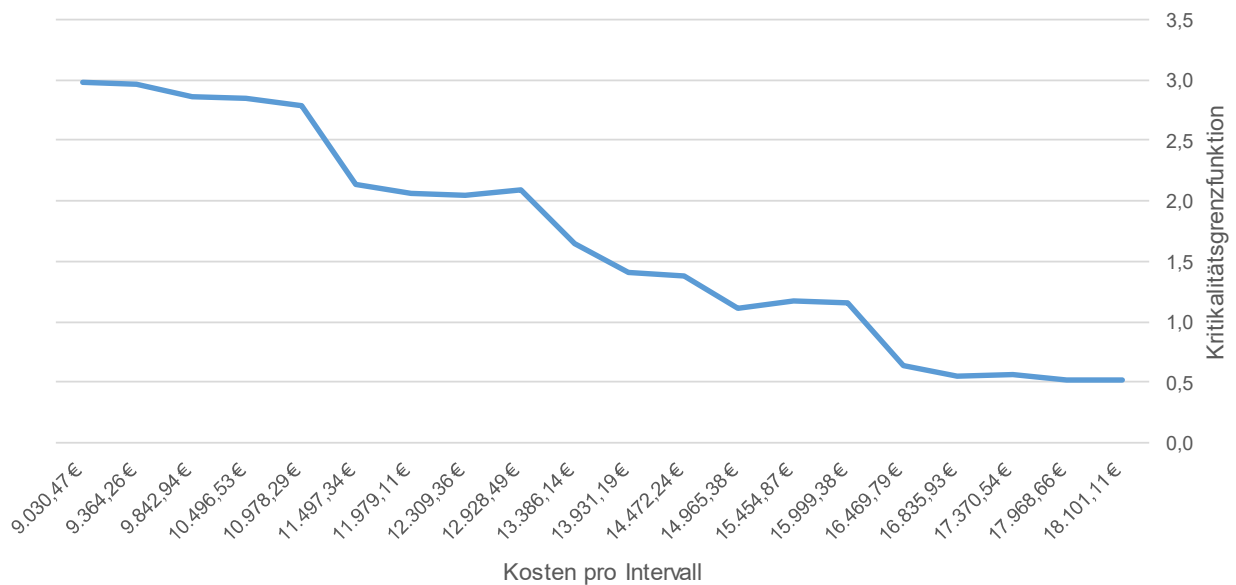


Abbildung 6-49: Verlauf der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen

Es lässt sich erkennen, dass im Allgemeinen mit steigenden Investitionen der Wert der Kritikalitätsgrenzfunktion sinkt. Da diese mit dem Nutzen korreliert, steigt demzufolge auch der Nutzen (bzw. der Schaden sinkt). Tatsächlich existieren jedoch Punkte, die einen schlechteren Wert in der Kritikalitätsgrenzfunktion aufweisen als die einer niedrigeren Investition. Dies geschieht,

wenn der Wechsel der Strategien in mehreren Funktionseinheiten eine negative Änderung erzeugt. Der Nutzen einer Verbesserung der Strategie einer Funktionseinheit wird durch die Verschlechterung an einer anderen Stelle dann nicht kompensiert, wobei die Strategie der verbesserten Funktionseinheit mindestens der der verschlechterten entspricht (infolge der Nebenbedingungen). Hier folgt bereits aus der Interpretation selbst, dass solche Investitionen zu vermeiden sind, da der höhere Wert der Investitionen zu einem schlechteren absoluten (und damit ex aequo zu einem schlechteren relativen) Wert der Kritikalitätsgrenzfunktion führt. Hier zeigt sich damit ein Problem der Praktiken wie in 6.4.1.1, wenn, bspw. politisch motiviert, Haushalte verabschiedet werden, die finanzielle Mittel gewähren, die dann intuitiv aufgezehrt werden sollen.

Als lohnenswert sind dagegen solche Änderungen in der Planung der Investitionen anzusehen, bei denen große positive Änderungen erzeugt werden, das entspricht jenen Werten am Ende eines Intervalls mit großer negativer Steigung (mit $m = \Delta y / \Delta x$). Zur besseren Interpretation wird die Steigung im Folgenden graphisch dargestellt:

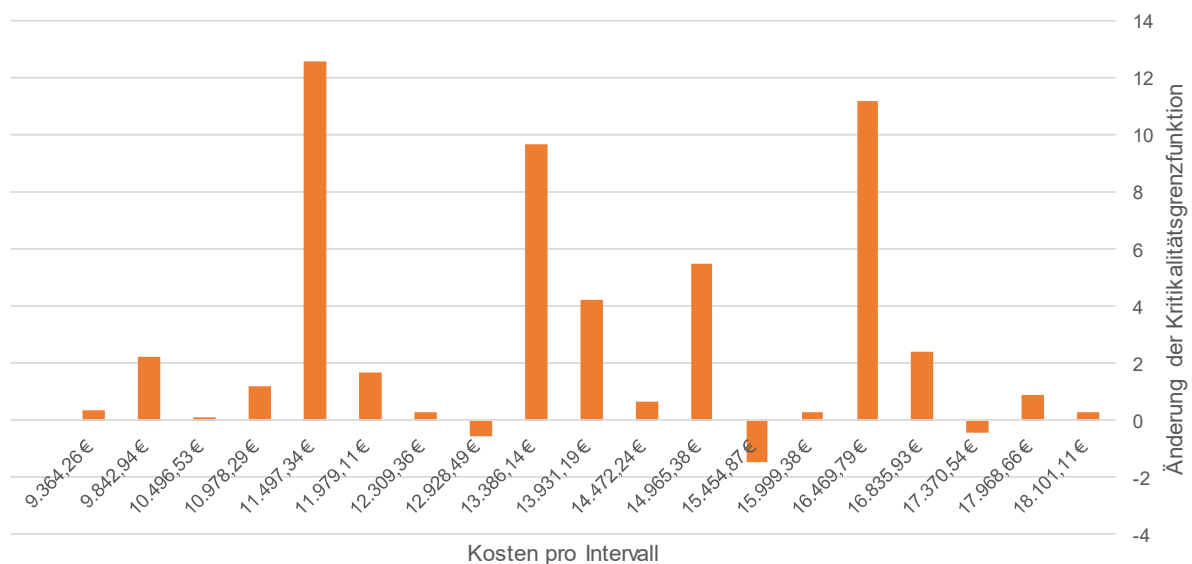


Abbildung 6-50: Änderung der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen

Die Abbildung zeigt, welche Verbesserung der Kritikalitätsgrenzfunktion mit zusätzlichen finanziellen Mitteln „erkauft“ werden kann. Die Verbesserung entspricht dabei der Steigung der Funktion (im Maßstab 1:10⁴). Die Investitionsgrenzen in Höhe von 11.500 €, 13.500 € und 16.500 € erzeugen deutlich höhere Nutzenzugewinne aus zusätzlichen 500 € als andere Werte. Auch ist erkennbar, welche zusätzlichen Investitionen eine negative Auswirkung erzeugen.

In der folgenden Abbildung ist die Aggregation dargestellt. Sie ermöglicht Aussagen bezüglich der Alternativen allgemein zu tätigen, statt nur auf die vorhergehende (um 500 € niedrigere). Neben den lohnenden Investitionen, die bereits in der Abbildung zuvor identifiziert wurden, wird hier der verschwindend geringe Einfluss in vielen möglichen Investitionsvolumina deutlich.

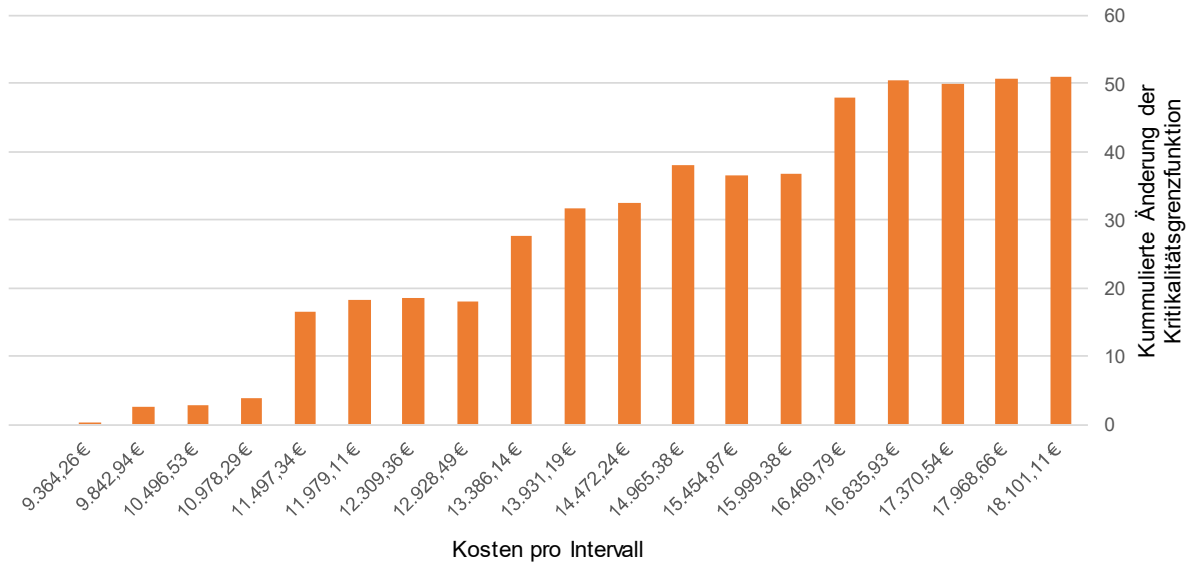


Abbildung 6-51: Kumulierte Änderung der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen

In der folgenden Tabelle sind die Resultate der Berechnung zusammenfassend aufgeführt. Damit ist eine eindeutige Zuordnung der vier Strategien (i bis iv) möglich, wobei der bisherigen Notation folgend i als die beste und iv als die schlechteste Strategie hinsichtlich der Verfügbarkeit gilt.

Kostengrenze	~9.000,00 €	9.500,00 €	10.000,00 €	10.500,00 €	11.000,00 €	11.500,00 €	12.000,00 €	12.500,00 €	13.000,00 €	13.500,00 €
Kosten	9.030,47 €	9.364,26 €	9.842,94 €	10.496,53 €	10.978,29 €	11.497,34 €	11.979,11 €	12.309,36 €	12.928,49 €	13.386,14 €
Grenze 3	0,99276	0,99949	0,96904	0,99831	1,00000	0,97199	0,94333	0,92676	0,99625	0,94649
Grenze 2	0,99276	0,99423	0,94644	0,93395	0,90166	0,93505	0,86142	0,86658	0,81578	0,36601
Grenze 1	0,99276	0,97300	0,94412	0,91915	0,89086	0,23271	0,25477	0,25762	0,27333	0,32952
Gmax	2,97827	2,96672	2,85959	2,85140	2,79253	2,13975	2,05952	2,05096	2,08537	1,64202
Funktionseinheit A	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv
Funktionseinheit B	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv
Funktionseinheit C	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie ii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie i	Strategie ii	Strategie ii
Funktionseinheit D	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii
Funktionseinheit E	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv
Funktionseinheit F	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii
Funktionseinheit G	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv
Funktionseinheit H	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iv	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie ii	Strategie i
Funktionseinheit I	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii
Kostengrenze	14.000,00 €	14.500,00 €	15.000,00 €	15.500,00 €	16.000,00 €	16.500,00 €	17.000,00 €	17.500,00 €	18.000,00 €	18.500,00 €
Kosten	13.931,19 €	14.472,24 €	14.965,38 €	15.454,87 €	15.999,38 €	16.469,79 €	16.835,93 €	17.370,54 €	17.968,66 €	18.101,11 €
Grenze 3	0,95077	0,91542	0,47388	0,75602	0,77004	0,25181	0,20071	0,19800	0,17485	0,17131
Grenze 2	0,23348	0,23487	0,41240	0,22283	0,19658	0,21425	0,17725	0,19206	0,17131	0,17131
Grenze 1	0,22854	0,22723	0,22065	0,20099	0,19613	0,17131	0,17131	0,18204	0,17131	0,17131
Gmax	1,41280	1,37753	1,10693	1,17983	1,16275	0,63738	0,54928	0,57210	0,51748	0,51394
Funktionseinheit A	Strategie ii	Strategie ii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit B	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iv	Strategie ii	Strategie i
Funktionseinheit C	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit D	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit E	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iv	Strategie ii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit F	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit G	Strategie iv	Strategie iv	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit H	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Funktionseinheit I	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i

Tabelle 6-14: Optimierter Strategiemix in Abhängigkeit von den gegebenen Kostengrenzen

6.4.1.3 Auswirkungen geänderter Leistung an definiten Objekten

Im Folgenden sollen die Auswirkungen der Instandhaltungsstrategien auf ein Objekt untersucht werden, wenn die Leistung variiert. Alle übrigen Parameter bleiben unverändert.

Es sind insgesamt 8 Objekte gegeben (A bis H). Alle acht weisen eine unterschiedliche, steigende Leistung auf, die über sie abgewickelt wird. Die erhöhte Leistung führt ceteris paribus zu einer steigenden Kritikalität. Die einzelwirtschaftliche Komponente bleibt zwar unverändert, die sozioökonomische gewinnt jedoch, aufgrund des steigenden Einflusses, an Relevanz. Die übrigen Parameter bleiben unverändert. Das gilt vor allem für die Grenzen der Strategiewahl. Das führt zu einer Änderung des Strategiemix über die Objekte hinweg. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf über eine Instandhaltungsdauer von 100 Jahre hinweg:

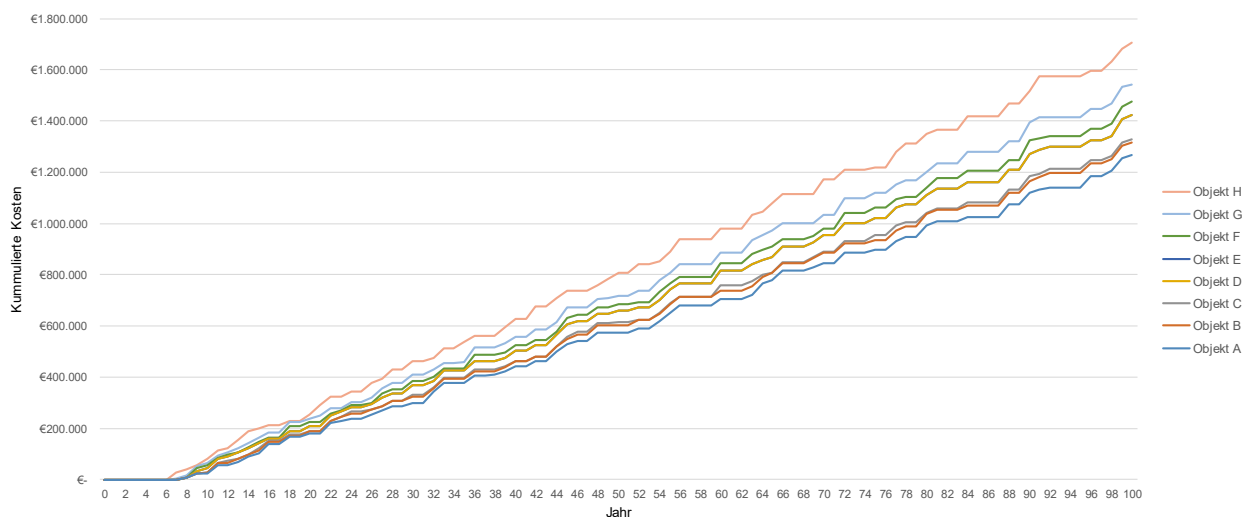


Abbildung 6-52: Kosten der Instandhaltung auf Basis der Kritikalität in Abhängigkeit vom Objekt

Je höher die Leistung, die über das Objekt abgewickelt wird, desto höher sind auch die Instandhaltungskosten. Die ordinale Beziehung zwischen Leistung bzw. Nutzen und Kosten ist demzufolge gegeben. Je höher der Nutzen und damit die Bedeutung, desto höher die Kosten, die für das Objekt veranschlagt werden. Auch der Zeitpunkt, ab dem die Maßnahmen der Instandhaltung aufgenommen werden, sind unterschiedlich. Je bedeutender das Objekt, desto früher beginnen sie, um der geforderten Verfügbarkeit, in Korrelation zur Bedeutung, gerecht zu werden. Der Strategiemix steigt infolgedessen wie zu erwarten an. Dominiert auf dem unbedeutendsten Objekt A noch die Strategie iii, dominiert auf dem bedeutsamsten Objekt H die Strategie i. Die folgende Tabelle zeigt die Verteilung der Strategiemixe über die Objekte und damit die Bedeutung bzw. Leistung.

		Objekt A	Objekt B	Objekt C	Objekt D	Objekt E	Objekt F	Objekt G	Objekt H
Kritikalität	Funktionseinheit A	0,22547	0,30102	0,34033	0,38125	0,43047	0,46782	0,53566	0,71476
	Funktionseinheit B	0,26821	0,33424	0,37003	0,40798	0,45431	0,48985	0,55500	0,72937
	Funktionseinheit C	0,32977	0,38539	0,41681	0,45084	0,49316	0,52609	0,58723	0,75418
	Funktionseinheit D	0,41233	0,45803	0,48477	0,51432	0,55179	0,58141	0,63726	0,79376
	Funktionseinheit E	0,45375	0,49593	0,52085	0,54858	0,58397	0,61211	0,66550	0,81677
	Funktionseinheit F	0,49517	0,53382	0,55693	0,58284	0,61616	0,64281	0,69375	0,83978
	Funktionseinheit G	0,53568	0,57160	0,59325	0,61763	0,64916	0,67452	0,72322	0,86429
	Funktionseinheit H	0,62871	0,65959	0,67843	0,69985	0,72783	0,75053	0,79459	0,92483
	Funktionseinheit I	0,73482	0,76140	0,77778	0,79654	0,82123	0,84141	0,88094	1,00000
Strategie	Funktionseinheit A	Strategie iv	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii
	Funktionseinheit B	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii
	Funktionseinheit C	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i
	Funktionseinheit D	Strategie iii	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i
	Funktionseinheit E	Strategie iii	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i
	Funktionseinheit F	Strategie iii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i
	Funktionseinheit G	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i
	Funktionseinheit H	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie ii	Strategie i
	Funktionseinheit I	Strategie ii	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i	Strategie i
Kosten	13.186,58 €	13.712,77 €	13.839,51 €	14.755,01 €	14.755,01 €	14.992,09 €	15.771,62 €	17.642,57 €	

Tabelle 6-15: Strategienmix der einzelnen Objekte in Abhängigkeit von der individuellen Kritikalität

6.4.2 Instandhaltung auf Basis der Ausfallbedeutung

Für die Betrachtung der Ausfallbedeutung sind, wie bereits festgestellt wurde, explizite Objekte und Szenarien notwendig. Diese können vor dem Hintergrund ihres Nutzens bewertet werden. Anders als bei der Kritikalitätsbetrachtung steht hier, analog zur klassischen Kosten-Nutzen-Rechnung, das Finden der wirtschaftlichsten Alternative im Vordergrund. Aber auch zur Bewertung eines eingetretenen wirtschaftlichen Schadens kann das Verfahren verwendet werden.

Im Folgenden werden zwei Beispiele aufgegriffen. Zum einen soll der volkswirtschaftliche Schaden vor dem Hintergrund der betriebswirtschaftlichen Kosten eines Objektes aufgezeigt werden. Zum anderen soll der Verlauf des Schadenwachstums innerhalb kurzer Zeiträume betrachtet werden, wenn die Maßnahme ausgesetzt bzw. aufgeschoben wird.

Anders als bei der Betrachtung der Kritikalität, bei der jeder Funktionseinheit eine explizite Instandhaltungsstrategie zugewiesen wird, wird bei der Ausfallbedeutung die Bedeutung der Instandhaltung dargestellt, unabhängig von der zu wählenden Instandhaltungsstrategie, da hier eine Bewertung über Grenzen nicht möglich ist. Stattdessen werden der Wert und Nutzen der Instandhaltung mit dem Schaden des Ausfalls in Relation gesetzt.

6.4.2.1 Ausfallbedeutung eines Infrastrukturobjektes (am Beispiel der Rheinbrücke Leverkusen im Zuge der BAB 1)

Mediale Aufmerksamkeit erlangte die Rheinbrücke bei Leverkusen im Zuge der Bundesautobahn 1 im Jahr 2012. Aufgrund von Rissen in der Tragkonstruktion kann die Brücke ihren Funktionsbetrieb nicht mehr uneingeschränkt aufrechterhalten. Die Brücke, die im Jahr 1965 eröffnet wurde, war ursprünglich als 4-spurige Autobahnbrücke realisiert worden. Später wurde sie auf sechs Spuren

erweitert. Das Land Nordrhein-Westfalen lässt die Brücke bis voraussichtlich 2025 neu bauen, dann mit 10 Fahrspuren.

Zwischen dem 30. November 2012 und dem 03. März 2013 (93 Tage) war die Brücke für Fahrzeuge mit einer zulässigen Gesamtmasse von über 3,5 t gesperrt, für die übrigen Verkehrsteilnehmer galt eine zulässige Höchstgeschwindigkeit von 60 km/h. Nach erfolgloser Notsanierung wurde dieser Umstand zum 16. Juni 2014 dauerhaft eingeführt. Bei einer Eröffnung Mitte des Jahres 2025 entspräche das einer Dauer von 4033 Tagen. Die höhere Kapazität der neuen Brücke wird vernachlässigt.

Mithilfe der vorgestellten Methodik auf Basis der EWS lässt sich nun der monetär bewertete Schaden ableiten, der durch die (Teil-)Sperrung entsteht. Dabei werden ein Szenario ohne Einschränkung (Soll) sowie ein Szenario mit Einschränkung (Ist) modelliert, bewertet und verglichen. Es werden die tatsächlichen Verkehrsstärken und Abmessungen verwendet. Im Ist-Fall wird der Schwerlastverkehr über die Nordumfahrungen BAB 57/59 und BAB 57/3 umgeleitet sowie über die Südumfahrung BAB 1/4/3. Das entspricht jenen Routen, die durch den Landesbetrieb Straßenbau NRW empfohlen wurden. Bundesstraßen werden nicht berücksichtigt.

Die Methodik wurde bereits an entsprechender Stelle beschrieben, weshalb sich nun vorrangig auf die Darstellung der Ergebnisse beschränkt werden soll, die aus der Verlagerung von ca. 12.000 Fahrzeugen des Schwerlastverkehrs sowie der Geschwindigkeitsherabsetzung der ca. 87.500 Fahrzeuge des Normallastverkehrs hervorgeht.

Unter Berücksichtigung der einschlägigen Kostenkennwerte ergibt sich für das Bezugsjahr 2017 die folgende Bewertung:

Kostengruppe		Einheit	monetäre Bewertung	
Betriebskosten	BK-Grundwerte	km	172.774,10 €	253.330,58 €
	Kraftstoff	l	80.556,48 €	
Zeitkosten		h	356.765,91 €	
Unfallkosten		km	12.967,69 €	
Lärmkosten		LEG	- €	
Schadstoffe, gasförmig	NO _x	t, t NO _x - Äquivalent	18.050,34 €	18.401,64 €
	SO ₂		19,72 €	
	NMVOG		331,58 €	
Schadstoffe, partikelförmig	PM _{2,5}		963,23 €	5.561,46 €
	PM ₁₀		4.598,23 €	
CO ₂				23.866,53 €
Summe			670.893,82 €	

Tabelle 6-16: Monetäre Bewertung des Ausfalls der Rheinbrücke BAB 1 (pro Tag)

Wie bereits dargestellt, entfallen die größten Schäden auf die zusätzliche Strecke sowie die zusätzliche Zeit, die vom Verkehr benötigt wird. Die Summe beträgt 91 %, während sich die restlichen 9 % auf die CO₂-Emissionen (~4 %), sonstige Schadstoffe (~4 %) sowie die Unfallkosten (2 %) beziehen. Die Verteilung entspricht dabei im Allgemeinen der bereits aufgezeigten. Der absolute Schaden in Höhe von knapp 671.000 € pro Tag erzeugt für den Zeitraum in den Jahren 2012/2013 einen kumulierten Schaden in Höhe von 62,4 Mio. €. Für den Zeitraum ab 2014 bis 2025 beträgt der Schaden, ohne Änderung des Verkehrsaufkommens oder der Kennwerte, 2,7 Mrd. €. Die Kosten für den Neubau betragen (Stand Zuschlag) 362 Mio. €, was 12,65 % des kumulierten Schadens entspricht.

6.4.2.2 Auswirkung zeitlicher Verschiebungen der Maßnahmen

Im Folgenden soll anhand eines fiktiven Beispiels mit realen Werten die Auswirkung untersucht werden, die entsteht, wenn nach einem Ausfallereignis die notwendigen Maßnahmen nicht direkt, sondern aufgeschoben ausgeführt werden. Es handelt sich dementsprechend um eine reaktive Strategie, einmal um die sofortige, und einmal um die aufgeschobene Instandhaltung.

Als Ausfallpunkt wird die in 6.4.2.1 beschriebene Brücke verwendet. Die Zusammensetzung des Verkehrs ist bekannt und die Summe in der folgenden Abbildung über 168 Stundenwerte (7 Tage x 24 Stunden) für eine Woche dargestellt, von Montag bis Sonntag. Es wurde dazu eine repräsentative Ganglinienkombination gewählt.

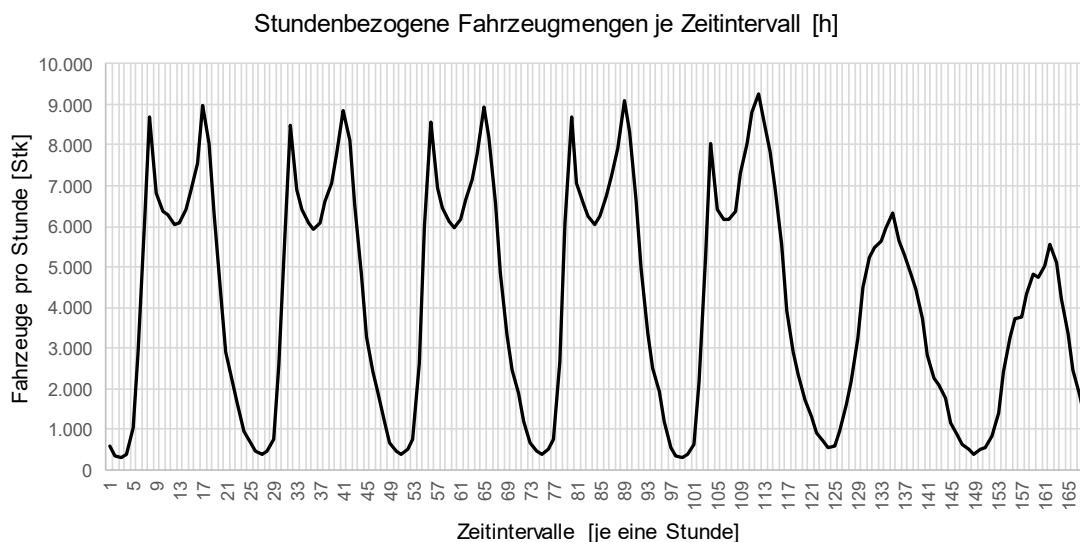


Abbildung 6-53: Fahrzeugmenge über 168 Stundenwerte einer Woche

Es wird nun ein Zwischenfall modelliert, der am Montagmorgen zwischen 5 und 6 Uhr im beginnenden Berufsverkehr auftritt. Der Zeitpunkt ist statistisch nicht unwahrscheinlich, wenngleich für den Verkehr sehr ungünstig gewählt. Die Behebung des Ausfalls dauert 18 Stunden. Während der Einschränkung ist die zulässige Höchstgeschwindigkeit für den Verkehr auf 80 km/h

beschränkt. Während der Behebung ist die Passage der Ausfallstelle für den Schwerlastverkehr untersagt, die rechte der drei Spuren gesperrt. Der Schwerlastverkehr wird auf zwei Umfahrungen umgeleitet, welche mit 54 bzw. 55 km Länge etwa gleich lang sind. Die 54 km lange Umfahrung nimmt 72,8 % des Verkehrs auf, die 55 km lange 27,2 %. Dadurch wird die Auslastung der Umfahrungen optimal bedient.

Es werden nun zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Behebung des Ausfalls untersucht. Zum einen die direkte Behebung im Anschluss an den Ausfall (Farbe Blau). Das bedeutet, dass die Behebung zwischen 5 und 6 Uhr beginnt, und zwischen 23 und 24 Uhr endet. Zum anderen wird die Behebung solange aufgeschoben, bis der Verkehr in der Behebungszeit erstmals deutlich geringer ist, was in der Nacht von Samstag zu Sonntag der Fall ist, zwischen 19 und 20 Uhr und 13 und 14 Uhr (Farbe Orange). Während der Aufschubzeit, die mit 5,5 Tagen fast die ganze Woche andauert, entsteht ein permanenter Schaden, der dem geringeren Schaden der besseren Behebungszeit angerechnet werden muss. Dieser wird mit dem höheren Schaden der sofortigen Behebung verglichen.

Zur Betrachtung der Auswirkungen werden drei Bereiche verglichen. Zum einen die zusätzliche Zeit und die zusätzliche Strecke, die der Verkehr zurücklegen muss, zum anderen die Zeit, zu welcher diese zusätzlichen Mengen anfallen. Als dritter Bereich werden die zusätzlichen Kosten betrachtet, die entstehen. Sie stellen zudem das entscheidende Kriterium für die Bewertung dar.

In der folgenden Abbildung wird die zusätzliche Zeit in Stunden sowie die zusätzliche Strecke in Kilometern für beide Varianten dargestellt.

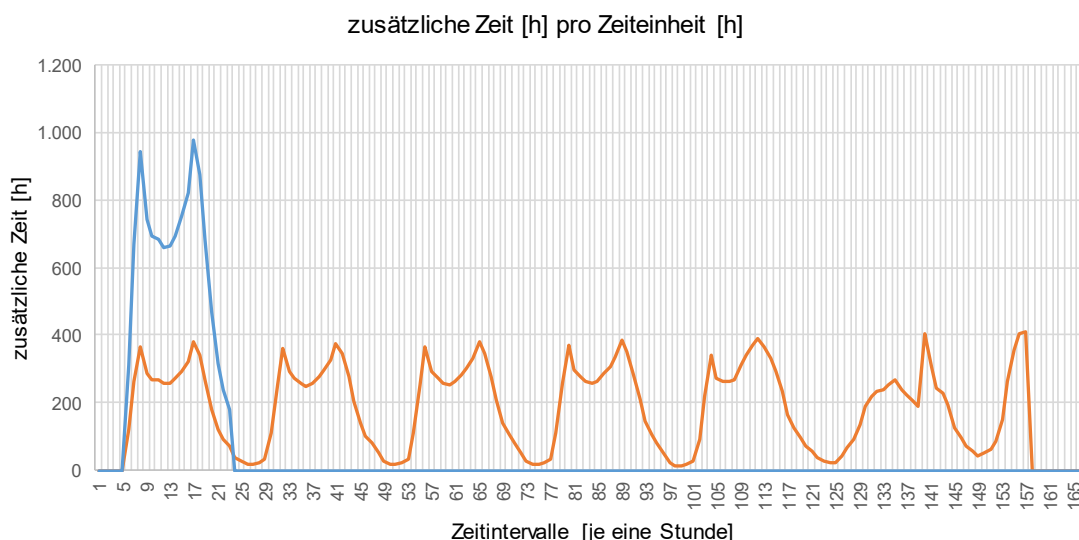


Abbildung 6-54: Zusätzlich abzuwickelnde Zeit des Verkehrs für beide Varianten

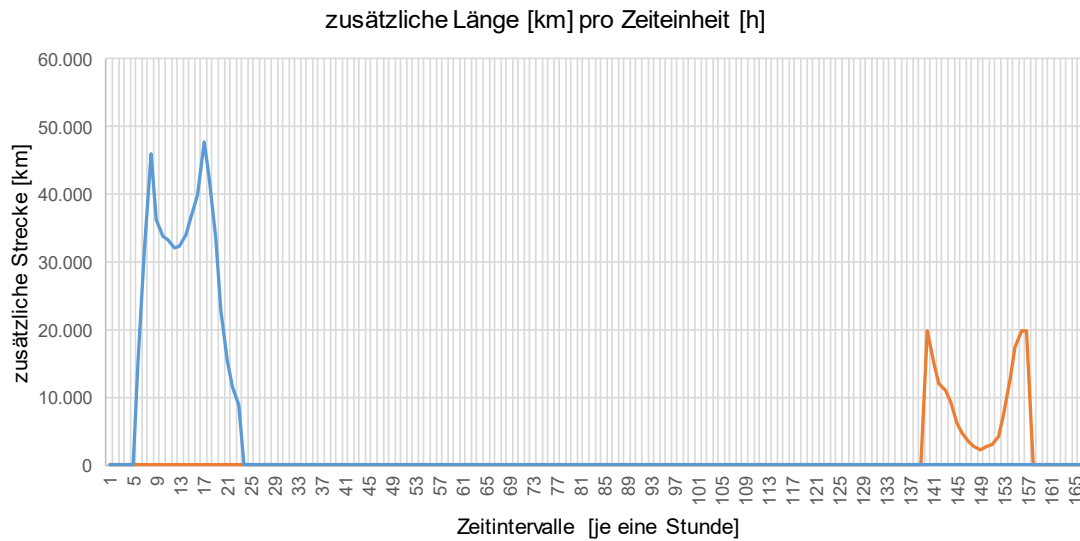


Abbildung 6-55: Zusätzlich abzuwickelnde Länge des Verkehrs für beide Varianten

Im Falle einer direkten Behebung des Schadens entsteht ein sehr hoher zusätzlicher Zeitbedarf über die 18 Stunden der Behebung. Durch Aufschiebung steigt der Wert intervallbetrachtet lediglich auf ca. 40 % des Wertes. Dafür ist die Anzahl der Intervalle, die eine zusätzliche Zeit aufweisen, deutlich höher. Bei Behebung im aufgeschobenen Fall ist die zusätzliche Zeit jedoch nur geringfügig höher als sie es während der Aufschiebung ist, bei angesprochenen 40 % gegenüber der sofortigen Behebung.

Die zusätzliche Länge entsteht nur während der Behebung, jedoch nicht während der Einschränkung. Demzufolge werden, im Bereich der zusätzlichen Länge, in beiden Fällen nur die jeweiligen 18-stündigen Behebungsdauern einen Schaden erzeugen. Da die Mengen direkt vom Schwerlastverkehr abhängen, verhalten sie sich proportional. Dabei werden bei direkter Behebung Werte erzeugt, die fast 2,5-mal so hoch sind wie bei der aufgeschobenen Variante.

Um sinnvolle Aussagen tätigen zu können, ist zum einen die monetäre Bewertung und zum anderen eine Kumulierung notwendig. Erst die Summe der monetär bewerteten Ausfallfolgen kann den Vorteil einer Variante gegenüber der anderen begründen. In der folgenden Abbildung sind die beiden Varianten monetär bewertet dargestellt. Dabei sind, basierend auf Zeiten und Längen, die Kosten entsprechend der geschilderten Methodik ermittelt worden. Auch Unfall- und verschiedene Schadstoffkosten wurden berücksichtigt.

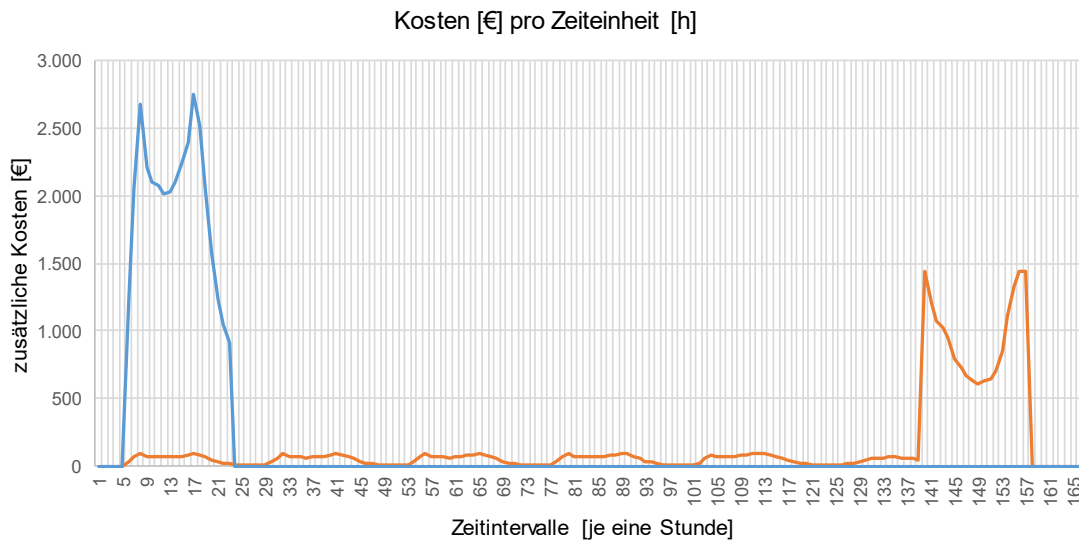


Abbildung 6-56: Volkswirtschaftliche Kosten während der Einschränkung

Durch die bereits aufgezeigte starke Abhängigkeit von Zeit und Länge ist der Verlauf der Kosten antizipierbar und folgt qualitativ der Überlagerung der beiden entsprechenden Kurven. Die Verteilung der Kosten fällt bei direkter Behebung mit dem Behebungsintervall zusammen. Bei aufgeschobener Instandhaltung entstehen in Abhängigkeit vom Verkehr während des Aufschubs sowie während der Behebung Kosten.

Durch Kumulation werden im Folgenden die Verläufe solcherart quantifiziert, dass Aussagen bezüglich der Wirtschaftlichkeit möglich sind. Entsprechend der aufgezeigten Verläufe ergeben sich dazu folgende Verläufe:

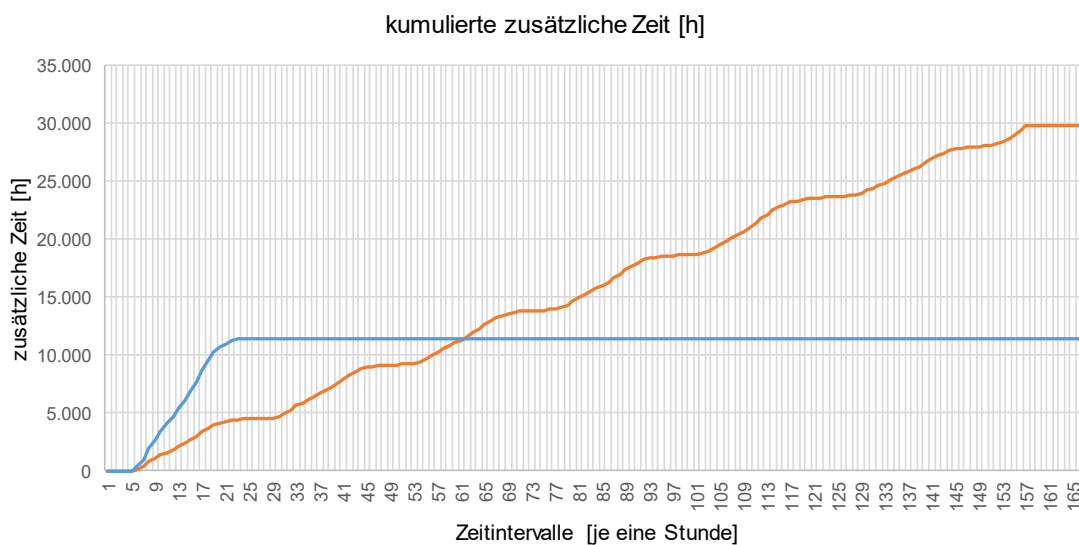


Abbildung 6-57: Kumulation der zusätzlich abzuwickelnden Zeit des Verkehrs für beide Varianten

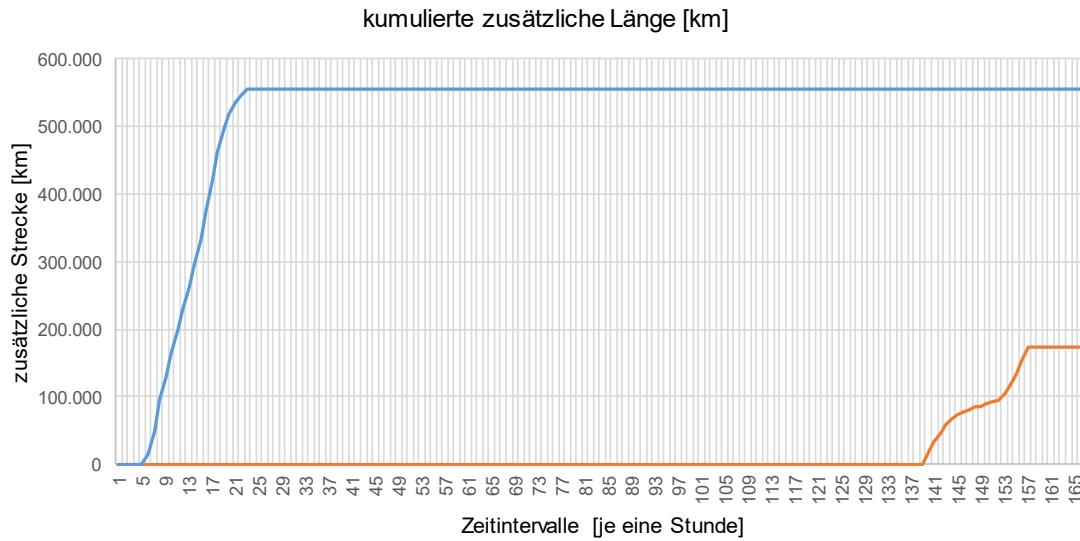


Abbildung 6-58: Kumulation der zusätzlich abzuwickelnden Länge des Verkehrs für beide Varianten

Während die kumulierte zusätzliche Zeit der aufgeschobenen Variante die der sofortigen Variante nach einer gewissen Zeit einholt und übersteigt, gilt dies für die zusätzliche Länge nicht. Hier bleibt die sofortige Behebung stets der schlechtere Fall, da die Menge wesentlich höher ist und außerhalb der Behebungszeit keine Mengen generiert werden.

Die unterschiedliche monetäre Bewertung wird jedoch, wie in der folgenden Abbildung gezeigt wird, die zusätzliche Länge gegenüber der zusätzlichen Zeit solcherart berücksichtigen, dass die Aufschiebung geringere zusätzliche Kosten erzeugt:

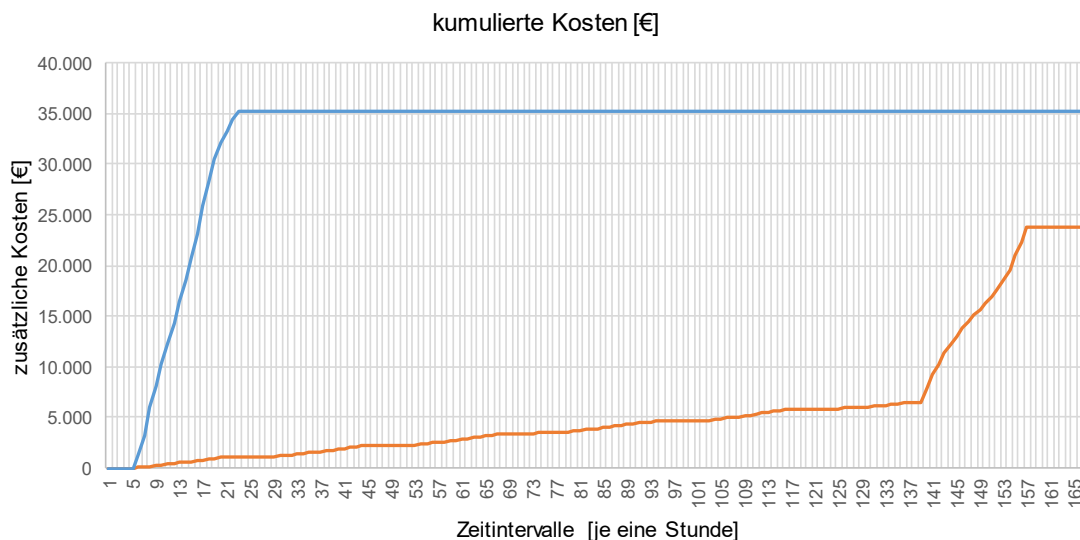


Abbildung 6-59: Kumulation der volkswirtschaftlichen Kosten während der Einschränkung

So werden bei direkter Behebung innerhalb der 18 Stunden 11.360 zusätzliche Stunden und 555.120 zusätzliche Kilometer Verkehrsleistung erzeugt. Monetär bewertet entspricht das 35.234,46 €.

Bei der aufgeschobenen Variante werden innerhalb der Aufschiebung 26.214 zusätzliche Stunden erzeugt und keine zusätzliche Strecke, da keine Umleitung notwendig ist. Monetär bewertet entspricht das 6.541,31 €. Die Behebung selbst erzeugt dann weitere 3.552 zusätzliche Stunden bzw. 173.599 zusätzliche Kilometer. Das entspricht 17.253,75 €. In Summe entstehen durch Aufschiebung 29.767 zusätzliche Stunden, 173.599 zusätzliche Kilometer und damit ein Wert von 23.795,05 €.

Die Aufschiebung erzeugt demnach 18.407 mehr zusätzliche Stunden als die sofortige Behebung. Gleichzeitig spart sie jedoch 381.521 zusätzliche Kilometer gegenüber der sofortigen Behebung ein. Das führt nach Bewertung zu einer geringeren volkswirtschaftlichen Belastung in Höhe von -11.439,41 €. Die Aufschiebung erzeugt damit 32 % weniger Schaden.

Durch das Beispiel lässt sich zeigen, dass es für den Verkehr und den entstehenden volkswirtschaftlichen Schaden sinnvoll sein kann, wenn die Maßnahmen, die den Funktionsbetrieb betreffen, zu späteren Zeiten getätigt werden. Entsprechend der Kreisdarstellung der Instandhaltung (und des Betriebs) bei permanenter Verfügbarkeit ist die Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens nie vollständig auszuschließen, jedoch zu minimieren. Dazu müssen die kumulierten Werte aus Aufschiebung und Behebung einer Variante kleiner sein als die aus Aufschiebung und Behebung einer anderen. Bei der Variante der sofortigen Behebung ist der Wert der Aufschiebung gleich null.

7 Ergebnisse der Arbeit

In Kapitel 5 wurden die Methoden entwickelt, um den Nutzen des Verkehrs zu beschreiben, die Vernetzung der Funktionseinheiten einzelner Objekte zu analysieren und zu erfassen, die Kritikalität sowie deren Maß zu bestimmen und eine Instandhaltungsplanung abzuleiten. Diese Methoden lagen dem in Kapitel 6 erzeugten Modell zugrunde. Die Aufgabe dieses Modells ist es, eine Handlungsempfehlung für das Management zu erzeugen. Aufbauend auf diesem, kann das Management die Allokation der finanziellen Mittel aus dem Budget vornehmen.

7.1 Leistung an den Objekten der Verkehrsinfrastruktur

In Kapitel 5.1 wurde eine Methodik hergeleitet, welche die (volkswirtschaftliche) Ausfallbedeutung von Objekten der Verkehrsinfrastruktur bestimmen kann. Diese baut auf der Kosten-Nutzen-Betrachtung auf, wie sie bspw. im Bereich des Bundesverkehrswegeplans angewandt wird, um über die Aufnahme in die Bedarfsplanung zu entscheiden. Während die Kosten-Nutzen-Analyse dort im Bereich von Neubau- und Erweiterungsvorhaben verwendet wird, lässt sie sich, wie gezeigt wurde, auch verwenden, um zu untersuchen, wie sich der Ausfall eines Objekts auswirkt. Statt dem Neubau eines nichtvorhandenen Objekts wird dazu der Ausfall eines vorhandenen Objekts untersucht. Der Ausfall eines Objekts stellt dementsprechend eine Alternative im Sinne der Kosten-Nutzen-Berechnung dar und das Objekt selbst ist dann Untersuchungsgegenstand einer klassischen Kosten-Nutzen-Berechnung. Der negative Nutzen infolge des Ausfalls, folglich ein Schaden, entspricht dann der Ausfallbedeutung. Diese kann konkret, d. h. auch monetär, bestimmt werden und bspw. mit der Ausfallbedeutung gleichartiger Objekte in Relation gesetzt werden. Die Abbildung 7-1 zeigt den Ablauf einer solchen Berechnung, wie sie für konkrete Objekte wie Straßen, Brücken und Tunnel ausgeführt werden kann.

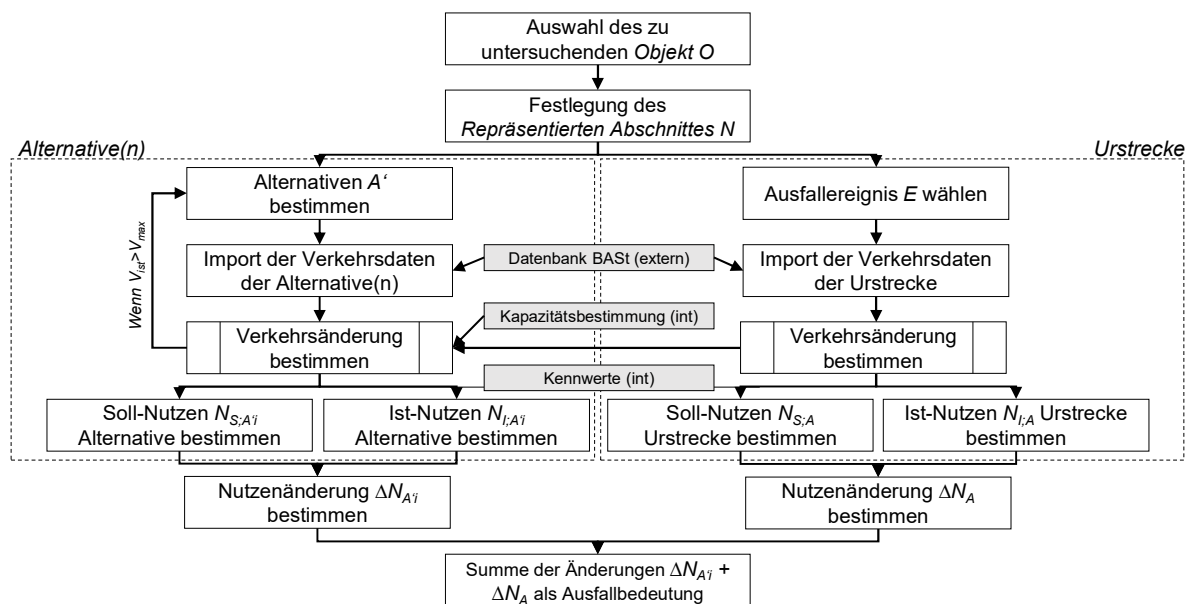


Abbildung 7-1: Ausfallbedeutung im Netzabschnitt N für Objekt O infolge Ausfallereignis E

Start der Untersuchung ist das zu untersuchende *Objekt O*, dessen Ausfallbedeutung bestimmt werden soll. Im Sinne der Graphentheorie wird darauf aufbauend der *Repräsentative Netzabschnitt N* bestimmt, der das Objekt O beinhaltet, und eine Abbildung mindestens der beiden Knoten, deren Verkehrsfluss über das Objekt O verläuft, der Kante mit dem Objekt O (*die Urstrecke*), und einer weiteren Kante als *Alternative A'*, enthält. Für das Objekt O wird das *Ausfallereignis E* ausgewählt, in einer Form, welche die Auswirkung auf den Verkehrsfluss beschreibt. Das können bspw. Auswirkungen auf die Geschwindigkeit oder die Verkehrsmenge sein. Sowohl für die Urstrecke als auch für die Alternative werden die Verkehrsdaten aus der entsprechenden Datenbank importiert. Anschließend werden für beide Strecken die Änderungen des Verkehrs berechnet. Zusätzlich wird für die Alternative die maximal mögliche Verkehrsänderung V_{\max} bestimmt. Ist der geänderte Verkehr V_{Ist} der Alternative größer als diese maximale Kapazität, muss die Menge der Alternativen erweitert werden.

Für Urstrecke und Alternativen werden dann gesondert zwei Fälle betrachtet. Es wird zum einen der Soll-Nutzen bestimmt, der aus dem etablierten Verkehr entsteht. Das Objekt wird dementsprechend als funktionstüchtig angenommen. Im zweiten Fall wird der Ist-Nutzen bestimmt, wenn das Objekt ausgefallen *ist*. Sowohl für die Urstrecke als auch für jede Alternative kann dann eine Differenz gebildet werden, welche die volkswirtschaftliche Änderung beschreibt. Durch Summe dieser Änderungen an Urstrecke und Alternative ergibt sich die Ausfallbedeutung im Netzabschnitt N für Objekt O infolge Ausfallereignis E.

Bei der Berechnung der Ausfallbedeutung werden ein konkretes Ausfallereignis vorausgesetzt und individuelle Alternativen benötigt. Das Ziel der Instandhaltung ist es, ebendieses Ausfallereignis zu vermeiden. Dies führt zu der Betrachtungsweise, dass statt der Ausfallbedeutung die wirtschaftliche Bedeutung, unabhängig vom Ausfallereignis, bestimmt werden sollte. Dadurch kann statt des *Repräsentativen Netzabschnitt N* ein beliebiger Netzabschnitt betrachtet werden. Das ermöglicht es zudem, den Netzabschnitt maximal zu erweitern und somit das Gesamtnetz zu bewerten. Dabei wird die wirtschaftliche Bedeutung eines Objektes losgelöst vom Ausfallereignis betrachtet und der Nutzen in Form der Leistung als Funktion des etablierten Verkehrs beschrieben. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 7-2 dargestellt.

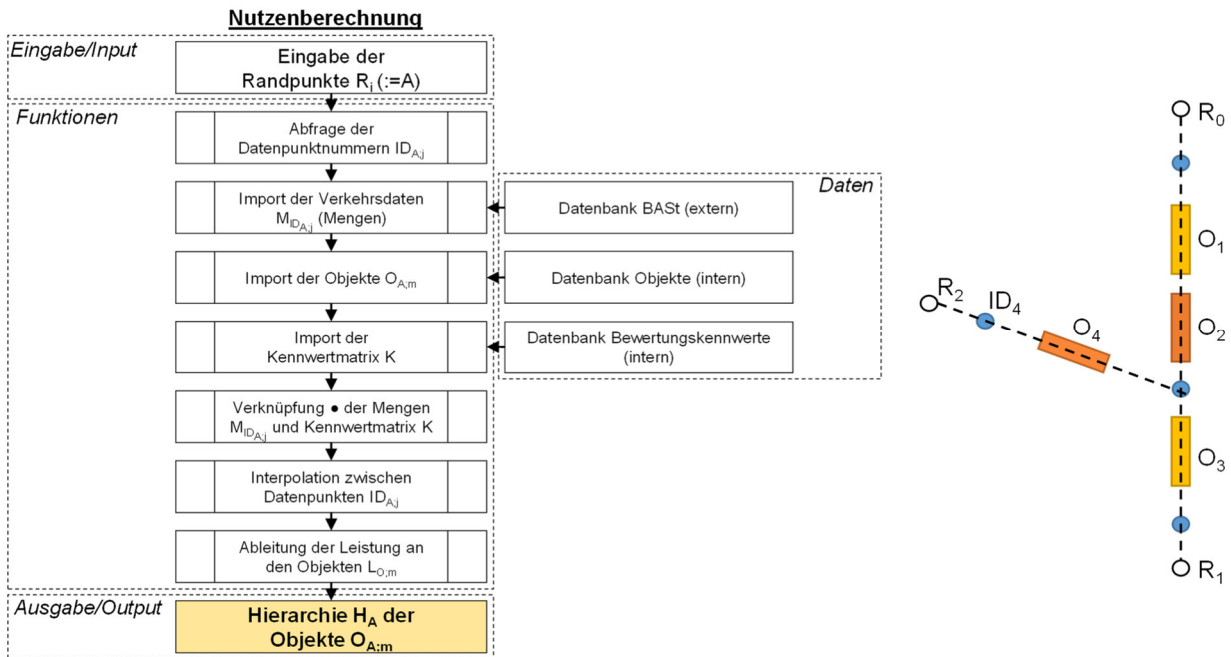


Abbildung 7-2: Leistungsberechnung für Netzabschnitte und Ableitung der Hierarchie

Die Anwendung dieser Methodik ist Gegenstand von Kapitel 6.1. Auf der rechten Seite der Abbildung 7-2 ist ein Netzabschnitt zwischen den drei Randpunkten R_0 , R_1 und R_2 beispielhaft skizziert. Sämtliche Randpunkte R_i des zu betrachtenden Netzabschnittes A werden eingegeben. Dadurch wird der Netzabschnitt A eindeutig als die Fläche zwischen den Randpunkten definiert. Anschließend werden alle Datenpunkte $ID_{A,j}$ innerhalb des Netzabschnittes A festgestellt. Dadurch lassen sich dann die Verkehrsdaten $M_{ID_{A,j}}$ aus der Datenbank *BAST* der (externen) *BAST*-Verkehrsdaten importieren. Basierend auf den Informationen der Datenpunktnummern $ID_{A,j}$ lassen sich zudem die beteiligten Objekte $O_{A,m}$ des Netzabschnittes A feststellen und aus der (internen) Datenbank *Objekte* importieren. Das gleiche gilt für die Kennwertmatrix K , welche aus der (internen) Datenbank *Bewertungskennwerte* importiert wird. Anschließend werden die Mengen $M_{ID_{A,j}}$ mit der Kennwertmatrix K verknüpft, um die Leistung $L_{A,j}$ an den Datenpunkten zu berechnen. Diese Verknüpfung wurde im Detail in Kapitel 6.1.6 beschrieben. Durch die Berechnung der Interaktionsparameter mittels entsprechendem Algorithmus können anschließend die Leistungswerte an den Objekten $L_{O,m}$ bestimmt werden, die innerhalb des Netzabschnittes A liegen. Die Objekte von A O_A werden dann, geordnet nach ihrer Leistung L_O , als Hierarchie H_A ausgegeben.

Um die geforderte Darstellung des gesamten Netzes zu erreichen, werden die Randpunkte entsprechend gewählt. Dadurch ergibt sich das maximal mögliche Netz, welches die gesamte Infrastruktur, d. h. alle Objekte, enthält.

Auf Basis der erzeugten Leistungskennwerte wurden Hierarchien für die Straßenverkehrsinfrastruktur der Bundesautobahn erzeugt, sowohl für die freie Strecke als auch die Ingenieurbauwerke Brücken und Tunnel. Die Tabelle 7-1 zeigt eine dieser Hierarchien. Sie

beschreibt die Bundesautobahnen mit dem durchschnittlichen Leistungskennwert (arithmetisches Mittel) sowie die Bundesländer, durch die sie verlaufen.

Pos.	Nr. BAB	Ø Leistung	tangierte Bundesländer	Pos.	Nr. BAB	Ø Leistung	tangierte Bundesländer
1	2	231.146	BB NI NW ST	26	52	99.170	NW
2	99	190.885	BY	27	96	97.504	BW BY
3	3	187.912	BY HE NW RP	28	72	96.942	BY SN
4	5	171.750	BW HE	29	93	95.556	BY
5	9	165.966	BB BY ST TH	30	48	92.305	RP
6	61	150.952	NW RP	31	24	89.347	BB MV SH
7	40	150.388	NW	32	38	85.276	NI SN ST TH
8	57	149.077	NW	33	27	82.023	HB NI
9	67	148.539	HE	34	66	81.271	HE
10	42	144.492	NW	35	73	81.210	BY TH
11	10	141.476	BE BB	36	94	78.148	BY
12	4	139.842	HE NW SN TH	37	63	77.705	RP
13	81	136.521	BW BY	38	65	74.419	RP
14	1	125.819	HB NI NW RP SH SL	39	39	74.409	NI
15	8	123.055	BW BY RP SL	40	70	67.781	BY
16	6	122.549	BW BY HE RP SL	41	650	65.343	RP
17	7	121.357	BW BY HE NI SH	42	620	62.517	SL
18	45	120.079	BY HE NW	43	33	62.473	NI NW
19	30	119.871	NI NW	44	23	56.819	SH
20	92	116.057	BY	45	623	56.335	SL
21	14	114.039	MV SN ST	46	20	52.380	MV SH
22	46	108.629	NW	47	31	50.297	NI NW
23	44	106.772	HE NW	48	19	49.291	MV
24	60	105.896	HE RP	49	71	44.145	BY TH
25	59	99.424	NW	50	62	29.051	RP SL

Tabelle 7-1: Hierarchie der Autobahnen nach durchschnittlicher Leistung (mind. 5 Messpunkte)

Die Aussagen innerhalb der Tabelle sind relativer Natur. So ist die Bundesautobahn 2 am bedeutendsten für den Verkehr, gefolgt von der Bundesautobahn 99, usw. Durch die Leistungskennwerte sind auch quantifizierte Aussagen möglich, wenngleich der Wert einer solchen nur bedingt gegeben ist. Die Leistungskennwerte sind über die gesamte Länge gemittelt, wodurch die qualitativen Aussagen ermöglicht werden. Im Rahmen der weiteren Analysen werden die Datenpunkte dagegen im Allgemeinen separat betrachtet. Dadurch werden die relevanten Abschnitte, in denen der Großteil der Leistung vollbracht wird, besser repräsentiert.

Es wurden insgesamt 23.753 Punkte der deutschen Autobahninfrastruktur untersucht. Zieht man die redundanten, weil sich überlagernden, Punkte ab, so ergibt sich eine Menge $M_{DP} = 12.352$. Die Abbildung 7-3 zeigt die Leistung innerhalb der deutschen Autobahninfrastruktur in Form des Nutzens im weiteren Sinne. Es handelt sich dabei um die grafische Darstellung der 12.352 Punkte, die im Rahmen der Arbeit betrachtet wurde. Bei einer Autobahnnetzlänge von 12.607 km entspricht das einem mittleren Abstand von 1,02 km je betrachtetem Punkt bzw. 0,98 Punkten je Kilometer.



Abbildung 7-3: Leistung des Verkehrs auf deutschen Bundesautobahnen

Die Darstellung folgt der Darstellung einer Heatmap, das bedeutet je stärker der Farbverlauf im roten Bereich ist, desto höher ist die Leistung an diesem Datenpunkt. Die Analyse von Nutzen und Leistung ist in Kapitel 6.1 ausführlich beschrieben.

7.2 Einflüsse und Vernetzung der Funktionseinheiten der Verkehrsinfrastrukturobjekte

In Kapitel 5.2 wurden die Elemente der Objekte der Verkehrsinfrastruktur hinsichtlich ihrer Funktion gegliedert. Dadurch ergaben sich die sog. Funktionseinheiten. Mithilfe einer Vernetzungsanalyse wurden die Einflüsse von und auf diese Funktionseinheiten beschrieben. Dazu wurden zwei Gruppen der Einflüsse eingeführt. Die systemimmanenten, das heißt die petalen Einflüsse, welche die Wirkungen der Funktionseinheiten untereinander beschreiben sowie die aus dem System heraus auf den Funktionsbetrieb wirkenden, das heißt die fugalen Einflüsse. Durch Verknüpfung der beiden Einflüsse ergibt sich der Gesamteinfluss, der gegebenenfalls noch stabilisiert werden muss. Die Stabilisierung basiert auf externen Einflüssen, wie durch legislative Verfügung angeordnete Bestimmungen.

Ergebnis dieser Methodik ist eine hierarchische Ordnung der Funktionseinheiten untereinander. Die Abbildung 7-4 zeigt das Vorgehen der Vernetzungsanalyse.

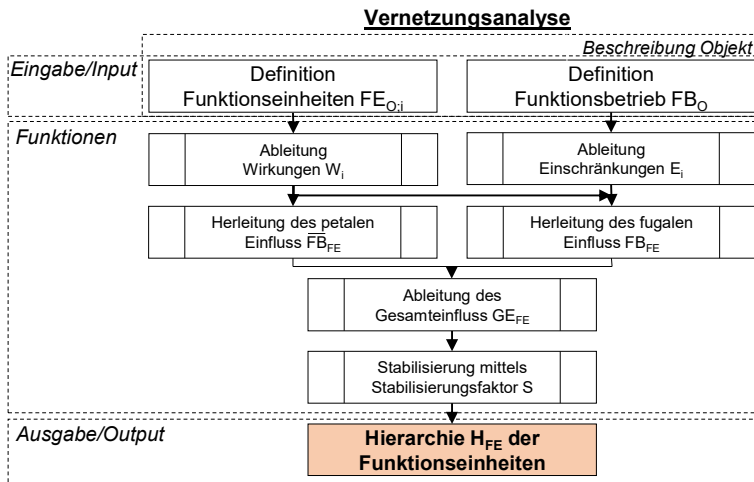


Abbildung 7-4: Ablauf der Vernetzungsanalyse zur Ableitung der Hierarchie

In der konkreten Anwendung in Kapitel 6.2 wurden die bereits definierten Funktionseinheiten eines Infrastrukturobjekts $FE_{O,i}$ in eine Matrix überführt und die petalen Einflüsse \overline{FB}_{FE} aus den Wirkungen W_i bestimmt. Ebenso wurde der Funktionsbetrieb FB_O des Objekts untersucht und die Einschränkungen E_i der Funktionseinheiten auf diesen untersucht. Dies ließ sich mittels einer Untersuchung der möglichen Einschränkungsszenarien anstellen. Das Ergebnis war hier der fugale, nach außen wirkende Einfluss FB_{FE} . Die beiden Einflusstypen wurden anschließend überlagert zu einem Gesamteinfluss GE_{FE} in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten. Unter Berücksichtigung der einschlägigen Regelwerke für Planung und Betrieb wurde eine Stabilisierung durchgeführt. Dazu diente ein hergeleiteter Stabilisierungsfaktor S (vgl. Kapitel 5.2.5). Das Ergebnis ist die hierarchische Struktur H_{FE} der Funktionseinheiten einzelner Objekte der Infrastruktur. Auch hier wurden sowohl die freie Strecke als auch die Ingenieurbauwerke Brücken und Tunnel getrennt betrachtet.

Die Abbildung 7-5 zeigt den resultierenden Einfluss von und auf die Funktionseinheiten an einem Beispiel. Dieser dient als Grundlage für die Ableitung der Bedeutung. Als Verknüpfung von petalem und fugalem Einfluss lässt sich der Gesamteinfluss in einer Abhängigkeit zwischen Aktivität und Passivität darstellen. In der Vernetzungsanalyse ist dieses Resultat die Rollenallokation.

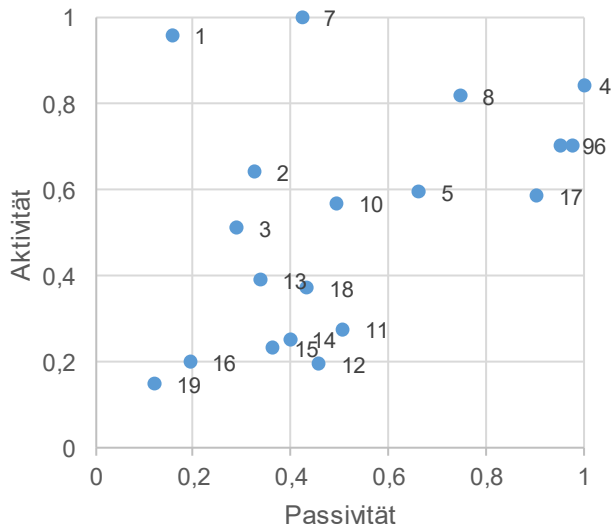


Abbildung 7-5: Einfluss der Funktionseinheiten

Abbildung 7-6 zeigt das Ergebnis der Analyse. Dabei wird den Funktionseinheiten ihr jeweiliges Maß an Bedeutung für den Funktionsbetrieb zugeordnet. Die Funktionseinheiten sind der Bedeutung nach aufsteigend sortiert. Der Maximalwert entspricht, per definitionem, dem Wert 1. Es handelt sich somit letzten Endes um eine Monohierarchie bzw. Rangordnung. Dabei wird eine eindimensionale Anordnung nach dem Einfluss der Elemente erstellt. Dabei steigt die *kritische Eigenschaft* (Bedeutung), die den Punkten innewohnt, von links nach rechts an. Eine Funktionseinheit mit einer Bedeutung nahe Null ist weniger kritisch als eine nahe Eins, sie kann jedoch nicht als *unkritisch* bezeichnet werden.

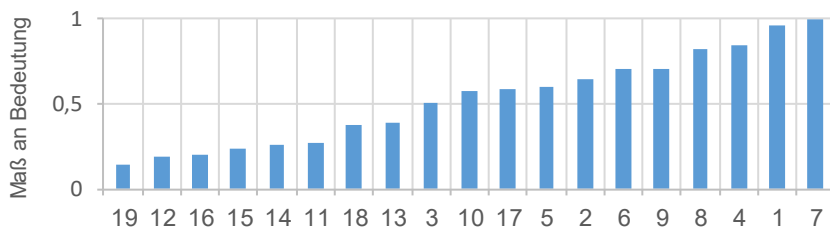


Abbildung 7-6: Bedeutungszuwachs in Abhängigkeit von den Funktionseinheiten

7.3 Bestimmung eines Kritikalitätsmaßes

Kapitel 5.3 beschreibt die Methode zur Ableitung eines gesamtwirtschaftlichen Instandhaltungsmanagements auf Basis der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Betrachtung aus den vorherigen Kapiteln.

Zur Realisierung dieser Ableitung wurde ein zweidimensionaler Vektor entwickelt, der die beiden Komponenten zusammenführt, Der zweidimensionale **Kritikalitätsvektor** \vec{k}_e eines Elements in Abhängigkeit von den beiden Parametern.

Sämtliche Kritikalitätsvektoren einer betrachteten Menge bilden zusammen die **Kritikalitätsmatrix K**, welche in einem weiteren Schritt in das Intervall von 0 bis 1 normiert wurde. Das Maximum entspricht gemäß Definition 1. Die genaue Entwicklung der Größen ist in Kapitel 5.3.3 beschrieben.

Die Abbildung 7-7 fasst den Ablauf der Bestimmung des Kritikalitätsmaßes zusammen. Basierend auf der obligatorischen Dimensionierung wird die Matrix durch die Vektoren in Abhängigkeit von den beiden Hierarchien entwickelt. Anschließend lässt sich diese normieren und das Kritikalitätsmaß kann abgeleitet werden.

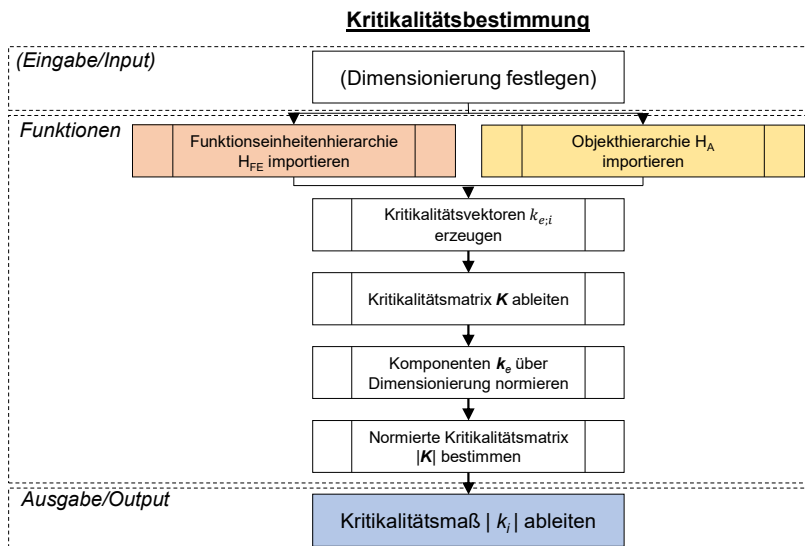


Abbildung 7-7: Ablauf der Kritikalitätsbestimmung und Ableitung des Kritikalitätsmaßes

Kapitel 6.3 enthält die Anwendung der Methodik im Rahmen des Modells. Die Dimensionierung ist optional, da es sich in der Regel um eine zweidimensionale Betrachtung handeln wird. Rein mathematisch betrachtet, kann aber jede Dimensionierung angewendet werden. Die beiden generierten Hierarchien, die der Funktionseinheiten H_{FE} aus der Vernetzungsanalyse sowie die der Objekte H_A aus der Nutzenbetrachtung werden importiert und aufbauend auf diesen die Kritikalitätsvektoren erzeugt. Diese erzeugen anschließend die Kritikalitätsmatrix. Deren Komponenten werden entsprechend der Dimensionierung normiert, wodurch sich die gesamte Matrix normieren lässt. Das Ergebnis dieser Funktionen ist die normierte Kritikalitätsmatrix $|K|$, aus der im letzten Schritt die normierten Kritikalitätsmaße $|k_i|$ abgeleitet und ausgegeben werden. Die Betrachtung bezieht sich dabei weiterhin auf die freie Strecke sowie die Ingenieurbauwerke Brücken und Tunnel. Somit wurden drei normierte Kritikalitätsmatrizen mit den entsprechenden Kritikalitätsmaßen erzeugt, die als Grundlage für die Instandhaltungsplanung dienen werden.

Abbildung 7-8 zeigt eine normierte Kritikalitätsmatrix für die Brückeninfrastruktur. Exemplarisch sind für die gemittelten Bundesautobahnen (Ordinate) und die Funktionseinheiten (Abszisse) die jeweiligen normierten Werte für das Maß der Kritikalität angetragen. Die Bundesautobahnen auf der Ordinate wurden über ihre Länge gemittelt. Eine Aussage über jeden Datenpunkt ist Ergebnis der Untersuchung.

		Funktionseinheiten																		
		FE 19	FE 12	FE 16	FE 15	FE 14	FE 11	FE 18	FE 13	FE 3	FE 10	FE 17	FE 5	FE 2	FE 6	FE 9	FE 8	FE 4	FE 1	FE 7
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,7148	0,7203	0,7211	0,7257	0,7294	0,7334	0,7542	0,7589	0,7938	0,8136	0,8192	0,8226	0,8398	0,8643	0,8643	0,9134	0,9248	0,9802	1,0000
	99	0,5932	0,5998	0,6009	0,6063	0,6107	0,6155	0,6401	0,6458	0,6863	0,7091	0,7155	0,7194	0,7391	0,7668	0,7668	0,8218	0,8345	0,8954	0,9171
	3	0,5842	0,5910	0,5920	0,5976	0,6020	0,6069	0,6319	0,6375	0,6786	0,7017	0,7081	0,7121	0,7319	0,7599	0,7599	0,8153	0,8281	0,8895	0,9113
	5	0,5357	0,5430	0,5441	0,5502	0,5550	0,5602	0,5872	0,5933	0,6373	0,6618	0,6686	0,6728	0,6937	0,7232	0,7232	0,7813	0,7946	0,8584	0,8809
	9	0,5183	0,5259	0,5271	0,5333	0,5383	0,5437	0,5715	0,5777	0,6228	0,6478	0,6548	0,6591	0,6804	0,7105	0,7105	0,7695	0,7830	0,8477	0,8705
	61	0,4734	0,4817	0,4830	0,4898	0,4952	0,5011	0,5311	0,5378	0,5859	0,6125	0,6199	0,6244	0,6469	0,6784	0,6784	0,7400	0,7540	0,8210	0,8445
	40	0,4717	0,4801	0,4813	0,4881	0,4936	0,4995	0,5296	0,5363	0,5846	0,6112	0,6186	0,6231	0,6457	0,6772	0,6772	0,7389	0,7530	0,8200	0,8436
	57	0,4678	0,4762	0,4775	0,4844	0,4899	0,4958	0,5261	0,5329	0,5814	0,6082	0,6156	0,6201	0,6428	0,6745	0,6745	0,7364	0,7505	0,8178	0,8414
	67	0,4662	0,4746	0,4759	0,4828	0,4883	0,4943	0,5247	0,5315	0,5801	0,6069	0,6144	0,6189	0,6416	0,6734	0,6734	0,7354	0,7495	0,8168	0,8405
	42	0,4542	0,4628	0,4641	0,4712	0,4768	0,4829	0,5140	0,5209	0,5705	0,5977	0,6053	0,6099	0,6329	0,6651	0,6651	0,7278	0,7421	0,8100	0,8339
	10	0,4452	0,4540	0,4554	0,4625	0,4683	0,4745	0,5061	0,5131	0,5634	0,5909	0,5986	0,6033	0,6265	0,6590	0,6590	0,7222	0,7366	0,8050	0,8290
	4	0,4403	0,4492	0,4506	0,4579	0,4637	0,4699	0,5018	0,5089	0,5595	0,5873	0,5950	0,5997	0,6231	0,6557	0,6557	0,7193	0,7337	0,8024	0,8264
	81	0,4305	0,4396	0,4410	0,4484	0,4543	0,4607	0,4932	0,5004	0,5518	0,5799	0,5877	0,5925	0,6162	0,6492	0,6492	0,7133	0,7278	0,7970	0,8212
	1	0,3988	0,4086	0,4101	0,4181	0,4244	0,4312	0,4658	0,4734	0,5244	0,5568	0,5649	0,5699	0,5945	0,6286	0,6286	0,6946	0,7096	0,7803	0,8051
	8	0,3906	0,4006	0,4022	0,4103	0,4168	0,4237	0,4588	0,4666	0,5213	0,5510	0,5592	0,5642	0,5890	0,6235	0,6235	0,6899	0,7050	0,7762	0,8011
	6	0,3891	0,3992	0,4007	0,4089	0,4154	0,4223	0,4575	0,4653	0,5202	0,5499	0,5582	0,5632	0,5880	0,6225	0,6225	0,6891	0,7042	0,7754	0,8003
	7	0,3856	0,3958	0,3973	0,4055	0,4121	0,4191	0,4545	0,4624	0,5176	0,5475	0,5557	0,5607	0,5857	0,6203	0,6203	0,6871	0,7022	0,7737	0,7986
	45	0,3819	0,3921	0,3937	0,4020	0,4086	0,4156	0,4514	0,4593	0,5148	0,5448	0,5531	0,5582	0,5832	0,6180	0,6180	0,6850	0,7002	0,7718	0,7968
	30	0,3813	0,3915	0,3931	0,4014	0,4080	0,4151	0,4508	0,4588	0,5143	0,5444	0,5527	0,5577	0,5828	0,6176	0,6176	0,6847	0,6998	0,7715	0,7965
	92	0,3700	0,3806	0,3822	0,3907	0,3975	0,4048	0,4414	0,4495	0,5061	0,5366	0,5450	0,5501	0,5756	0,6108	0,6108	0,6785	0,6938	0,7660	0,7912
	14	0,3641	0,3748	0,3765	0,3851	0,3920	0,3994	0,4365	0,4446	0,5018	0,5325	0,5410	0,5462	0,5718	0,6072	0,6072	0,6753	0,6907	0,7632	0,7885
	46	0,3483	0,3595	0,3612	0,3702	0,3774	0,3850	0,4233	0,4318	0,4914	0,5218	0,5305	0,5358	0,5618	0,5979	0,5979	0,6669	0,6825	0,7558	0,7813
	44	0,3429	0,3542	0,3560	0,3651	0,3724	0,3801	0,4189	0,4274	0,4866	0,5182	0,5270	0,5322	0,5585	0,5947	0,5947	0,6641	0,6797	0,7533	0,7789
	60	0,3403	0,3518	0,3535	0,3627	0,3700	0,3778	0,4168	0,4254	0,4848	0,5166	0,5253	0,5306	0,5569	0,5932	0,5932	0,6628	0,6784	0,7521	0,7778
	59	0,3215	0,3336	0,3355	0,3452	0,3528	0,3610	0,4016	0,4105	0,4718	0,5044	0,5133	0,5188	0,5457	0,5827	0,5827	0,6533	0,6692	0,7438	0,7697
	52	0,3208	0,3329	0,3348	0,3445	0,3522	0,3604	0,4010	0,4099	0,4713	0,5039	0,5129	0,5183	0,5452	0,5823	0,5823	0,6530	0,6688	0,7435	0,7694
	96	0,3160	0,3283	0,3302	0,3400	0,3478	0,3561	0,3972	0,4062	0,4680	0,5009	0,5099	0,5153	0,5424	0,5796	0,5796	0,6506	0,6665	0,7414	0,7674
	72	0,3144	0,3267	0,3286	0,3385	0,3463	0,3546	0,3959	0,4049	0,4669	0,4998	0,5089	0,5143	0,5415	0,5787	0,5787	0,6498	0,6658	0,7407	0,7668
	93	0,3104	0,3229	0,3248	0,3348	0,3427	0,3511	0,3927	0,4018	0,4642	0,4973	0,5064	0,5119	0,5391	0,5766	0,5766	0,6479	0,6639	0,7391	0,7651
	48	0,3010	0,3139	0,3159	0,3261	0,3342	0,3429	0,3854	0,3946	0,4580	0,4916	0,5007	0,5063	0,5338	0,5716	0,5716	0,6435	0,6596	0,7352	0,7614
	24	0,2926	0,3058	0,3078	0,3183	0,3266	0,3354	0,3788	0,3882	0,4525	0,4864	0,4957	0,5013	0,5291	0,5672	0,5672	0,6396	0,6558	0,7318	0,7581
	38	0,2810	0,2947	0,2968	0,3077	0,3163	0,3254	0,3699	0,3796	0,4451	0,4795	0,4889	0,4946	0,5228	0,5613	0,5613	0,6343	0,6507	0,7272	0,7537
	27	0,2717	0,2859	0,2881	0,2993	0,3081	0,3175	0,3630	0,3728	0,4393	0,4742	0,4837	0,4895	0,5179	0,5567	0,5567	0,6303	0,6467	0,7237	0,7503
	66	0,2696	0,2839	0,2861	0,2974	0,3063	0,3156	0,3614	0,3712	0,4380	0,4730	0,4825	0,4883	0,5168	0,5557	0,5557	0,6294	0,6459	0,7229	0,7495
	73	0,2694	0,2838	0,2859	0,2972	0,3061	0,3155	0,3613	0,3711	0,4379	0,4729	0,4824	0,4882	0,5167	0,5556	0,5556	0,6293	0,6458	0,7228	0,7495
	94	0,2608	0,2756	0,2778	0,2894	0,2985	0,3082	0,3549	0,3649	0,4327	0,4680	0,4777	0,4835	0,5122	0,5515	0,5515	0,6257	0,6422	0,7197	0,7464
	63	0,2596	0,2744	0,2767	0,2883	0,2975	0,3071	0,3540	0,3640	0,4319	0,4673	0,4770	0,4828	0,5116	0,5509	0,5509	0,6252	0,6417	0,7192	0,7460
	65	0,2504	0,2658	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4721	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7160	0,7429
	39	0,2504	0,2657	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4720	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7159	0,7428
	70	0,2321	0,2486	0,2511	0,2639	0,2738	0,2843	0,3343	0,3450	0,4160	0,4526	0,4626	0,4686	0,4982	0,5385	0,5385	0,6143	0,6311	0,7098	0,7369
	650	0,2255	0,2424	0,2449	0,2580	0,2682	0,2789	0,3298	0,3405	0,4123	0,4493	0,4593	0,4654	0,4952	0,5357	0,5357	0,6118	0,6287	0,7076	0,7348
	620	0,2178	0,2353	0,2379	0,2514	0,2618	0,2728	0,3246	0,3355	0,4082	0,4455	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
33	0,2177	0,2352	0,2378	0,2513	0,2617	0,2727	0,3245	0,3355	0,4081	0,4454	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325	
23	0,2027	0,2214	0,2242	0,2384	0,2494	0,2608	0,3146	0,3259	0,4003	0,4383	0,4486	0,4548	0,4852	0,5265	0,5265	0,6038	0,6209	0,7007	0,7282	
623	0,2014	0,2202	0,2230	0,2373	0,2484	0,2598	0,3138	0,3251	0,3997	0,4377	0,4480	0,4542	0,4847	0,5260	0,5260	0,6033	0,6205	0,7003	0,7278	
20	0,1912	0,2109	0,2138	0,2287	0,2401	0,2520	0,3074	0,3189	0,3946	0,4331	0,4435	0,4498	0,4805	0,5222	0,5222	0,6000	0,6172	0,6974	0,7250	
31	0,1859	0,2061	0,2091	0,2243	0,2359	0,2480	0,3041	0,3157	0,3921	0,4308	0,4412	0,4475	0,4784	0,5203	0,5203	0,5983	0,6156	0,6960	0,7237	
19	0,1834	0,2038	0,2068	0,2222	0,2339	0,2461	0,3025	0,3142	0,3909	0,4297	0,4402	0,4465	0,4775	0,5194	0,5194	0,5975	0,6149	0,6953	0,7230	
71	0,1706	0,1924	0,1957	0,2118	0,2241	0,2368	0,2950	0,3070	0,3851	0,4244	0,4350	0,4414	0,4727	0,5150	0,5150	0,5938	0,6112	0,6921	0,7199	
62	0,1370	0,1634	0,1672	0,1858	0,1997	0,2138	0,2769	0,2897	0,3714	0,4121	0,4230	0,4295	0,4617	0,5049	0,5049	0,5850	0,6027	0,6846	0,7127	

Abbildung 7-8: Kritikalitätsmatrix der Brücken an BAB (mind. 5 Zählstellen)

Da insgesamt die Funktionseinheiten von drei Typen von Infrastrukturobjekten i betrachtet wurden und dies über eine bestimmte Anzahl von Datenpunkten M_{DP} dieser Infrastrukturobjekte, ergibt sich die Anzahl an ermittelten Kritikalitätsmaßen zu

$$|k| = \sum_{i=0}^2 M_{DP,i} * |FE|_i$$

Formel 7-1: Mächtigkeit der Menge der Kritikalitätsmaße

Es ergibt sich durch die Mächtigkeit $|B|$ für die Anzahl der Datenpunkte an Brücken von 11.297, die Mächtigkeit $|T|$ für die Anzahl der Datenpunkte an Tunnel von 104 und die Bedingung $|S| = |B| + |T| + |M|$ (wobei M den 950 Zählstellen entspricht) für die Mächtigkeit für Straßen eine Anzahl von 12.352. Insgesamt entspricht das 23.754 Datenpunkte unterschiedlicher Infrastrukturobjekte. Multipliziert mit der jeweiligen Anzahl von Funktionseinheiten ergibt sich für die Mächtigkeit der Menge der Kritikalitätsmaße $|k|$ ein Wert von 364.843, welcher in seiner Form als Grundlage für die Instandhaltungsplanung verwendet werden kann.

7.4 Ableitung einer optimierten Instandhaltungsstrategie

Auf Basis des erarbeiteten Kritikalitätsmaßes lässt sich die Instandhaltung ableiten. In Kapitel 5.4 wurde dazu eine Methodik entwickelt, welche das Kritikalitätsmaß in eine Empfehlung zur Instandhaltung überführt. Die Instandhaltungsstrategien mussten dazu in eine Beziehung zueinander gebracht werden. Zudem waren Grenzen zwischen den Strategien zu definieren. Für die Handlungsempfehlung soll zudem eine Schlussfolgerung berücksichtigt werden, dass effiziente Instandhaltung nicht zwingend als eine Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage bzw. das gesamte Objekt verstanden werden sollte, sondern als eine Mischung aus der jeweils effizienten Strategie je Betrachtungseinheit (und damit Funktionseinheit), deren Summe erst die Anlage bzw. das Objekt darstellt.

Für die Grenzwerte innerhalb der Kritikalitätsbetrachtung ergeben sich jene Werte, zwischen denen die Instandhaltungsstrategie der betrachteten Einheit wechselt. Die Abbildung 7-9 zeigt diesen Zusammenhang.

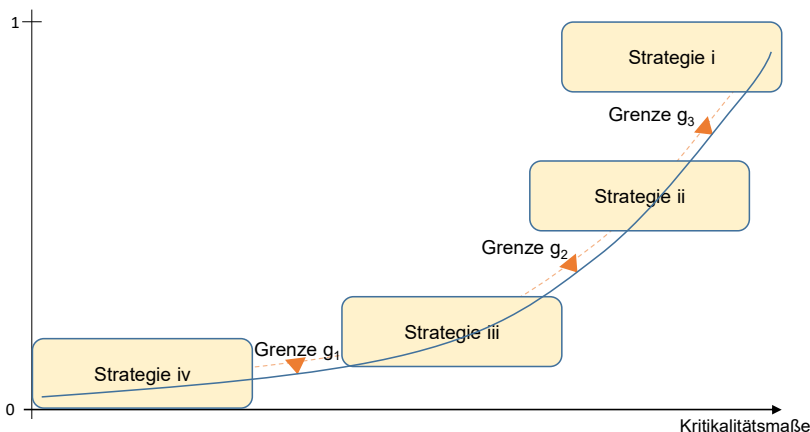


Abbildung 7-9: Zusammenhang zwischen Instandhaltungsstrategie und Kritikalitätsmaß

Die Wahl der Grenzwerte bedeutet demzufolge die eigentliche Aufgabe in der Planung der Instandhaltung auf Basis der ökonomischen und einzelwirtschaftlichen Bedeutung. In Kapitel 6.4 wurde die aufgezeigte Methodik verwendet, um gemischte, für jede Funktionseinheit individuell ermittelte Instandhaltungsstrategien zu bestimmen. Dabei kam insbesondere der Genese der

Grenzwerte Bedeutung zu. Es wurde gezeigt, wie die Instandhaltung abgeleitet wird, wenn die Grenzen durch das Management vorgegeben werden. Außerdem ließ sich eine Variante zeigen, in der ein Budget vorgegeben wird und die Grenzen dann so abgeleitet werden, dass der Nutzen der Instandhaltung maximal effizient ist.

Die folgende Abbildung 7-10 zeigt den Ablauf der Erzeugung der Instandhaltungsstrategie. Basierend auf den Prozessen und Maßnahmen der Instandhaltung lassen sich allgemeine Instandhaltungsstrategien definieren. 4 verschiedene Strategien erfuhren im Weiteren Betrachtung, woraus sich drei nichttriviale Grenzwerte ergaben. Die Grenzwerte entwickeln sich mittels Algorithmus auf Basis von Vorgaben, die durch das Management direkt oder indirekt (durch Budgetierung) definiert werden, was den Eingangsgrößen entspricht. Anschließend werden die Grenzwerte g_i bestimmt und die Kritikalitätsmaße k unter Berücksichtigung der Grenzwerte formatiert. Die resultierende Strategie S_M als Strategienempfehlung lässt sich dann ableiten und umsetzen.

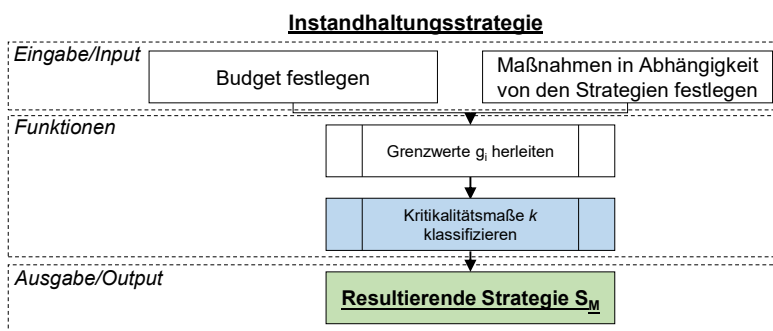


Abbildung 7-10: Erzeugung der resultierenden Instandhaltungsstrategie

In Analogie zur Abbildung 7-9 lässt sich die normierte Kritikalitätsmatrix unter Berücksichtigung der Grenzwerte solcherart formatieren, dass die Klassifizierung infolge der Grenzwerte sichtbar wird. Abbildung 7-11 zeigt diese Erweiterung. Die vier untersuchten Strategien sind nun durch die farbliche Darstellung eindeutig zu identifizieren. Die Grenzwerte wurden in der Abbildung exemplarisch angenommen.

		Funktionseinheiten																		
		FE 19	FE 12	FE 16	FE 15	FE 14	FE 11	FE 18	FE 13	FE 3	FE 10	FE 17	FE 5	FE 2	FE 6	FE 9	FE 8	FE 4	FE 1	FE 7
Bundesautobahnen (Nummer)	2	0,7148	0,7203	0,7211	0,7257	0,7294	0,7334	0,7542	0,7589	0,7938	0,8136	0,8192	0,8226	0,8398	0,8643	0,8643	0,9134	0,9248	0,9802	1,0000
	99	0,5932	0,5998	0,6009	0,6063	0,6107	0,6155	0,6401	0,6458	0,6863	0,7091	0,7155	0,7194	0,7391	0,7668	0,7668	0,8218	0,8345	0,8954	0,9171
	3	0,5842	0,5910	0,5920	0,5976	0,6020	0,6069	0,6319	0,6375	0,6786	0,7017	0,7081	0,7121	0,7319	0,7599	0,7599	0,8153	0,8281	0,8895	0,9113
	5	0,5357	0,5430	0,5441	0,5502	0,5550	0,5602	0,5872	0,5933	0,6373	0,6618	0,6686	0,6728	0,6937	0,7232	0,7232	0,7813	0,7946	0,8584	0,8809
	9	0,5183	0,5259	0,5271	0,5333	0,5383	0,5437	0,5715	0,5777	0,6228	0,6478	0,6548	0,6591	0,6804	0,7105	0,7105	0,7695	0,7830	0,8477	0,8705
	61	0,4734	0,4817	0,4830	0,4898	0,4952	0,5011	0,5311	0,5378	0,5859	0,6125	0,6199	0,6244	0,6469	0,6784	0,6784	0,7400	0,7540	0,8210	0,8445
	40	0,4717	0,4801	0,4813	0,4881	0,4936	0,4995	0,5296	0,5363	0,5846	0,6112	0,6186	0,6231	0,6457	0,6772	0,6772	0,7389	0,7530	0,8200	0,8436
	57	0,4678	0,4762	0,4775	0,4844	0,4899	0,4958	0,5261	0,5329	0,5814	0,6082	0,6156	0,6201	0,6428	0,6745	0,6745	0,7364	0,7505	0,8178	0,8414
	67	0,4662	0,4746	0,4759	0,4828	0,4883	0,4943	0,5247	0,5315	0,5801	0,6069	0,6144	0,6189	0,6416	0,6734	0,6734	0,7354	0,7495	0,8168	0,8405
	42	0,4542	0,4628	0,4641	0,4712	0,4768	0,4829	0,5140	0,5209	0,5705	0,5977	0,6053	0,6099	0,6329	0,6651	0,6651	0,7278	0,7421	0,8100	0,8339
	10	0,4452	0,4540	0,4554	0,4625	0,4683	0,4745	0,5061	0,5131	0,5634	0,5909	0,5986	0,6033	0,6265	0,6590	0,6590	0,7222	0,7366	0,8050	0,8290
	4	0,4403	0,4492	0,4506	0,4579	0,4637	0,4699	0,5018	0,5089	0,5595	0,5873	0,5950	0,5997	0,6231	0,6557	0,6557	0,7193	0,7337	0,8024	0,8264
	81	0,4305	0,4396	0,4410	0,4484	0,4543	0,4607	0,4932	0,5004	0,5518	0,5799	0,5877	0,5925	0,6162	0,6492	0,6492	0,7133	0,7278	0,7970	0,8212
	1	0,3988	0,4086	0,4101	0,4181	0,4244	0,4312	0,4658	0,4734	0,5274	0,5568	0,5649	0,5699	0,5945	0,6286	0,6286	0,6946	0,7096	0,7803	0,8051
	8	0,3906	0,4006	0,4022	0,4103	0,4168	0,4237	0,4588	0,4666	0,5213	0,5510	0,5592	0,5642	0,5890	0,6235	0,6235	0,6899	0,7050	0,7762	0,8011
	6	0,3891	0,3992	0,4007	0,4089	0,4154	0,4223	0,4575	0,4653	0,5202	0,5499	0,5582	0,5632	0,5880	0,6225	0,6225	0,6891	0,7042	0,7754	0,8003
	7	0,3856	0,3958	0,3973	0,4055	0,4121	0,4191	0,4545	0,4624	0,5176	0,5475	0,5557	0,5607	0,5857	0,6203	0,6203	0,6871	0,7022	0,7737	0,7986
	45	0,3819	0,3921	0,3937	0,4020	0,4086	0,4156	0,4514	0,4593	0,5148	0,5448	0,5531	0,5582	0,5832	0,6180	0,6180	0,6850	0,7002	0,7718	0,7968
	30	0,3813	0,3915	0,3931	0,4014	0,4080	0,4151	0,4508	0,4588	0,5143	0,5444	0,5527	0,5577	0,5828	0,6176	0,6176	0,6847	0,6998	0,7715	0,7965
	92	0,3700	0,3806	0,3822	0,3907	0,3975	0,4048	0,4414	0,4495	0,5061	0,5366	0,5450	0,5501	0,5756	0,6108	0,6108	0,6785	0,6938	0,7660	0,7912
	14	0,3641	0,3748	0,3765	0,3851	0,3920	0,3994	0,4365	0,4446	0,5018	0,5325	0,5410	0,5462	0,5718	0,6072	0,6072	0,6753	0,6907	0,7632	0,7885
	46	0,3483	0,3595	0,3612	0,3702	0,3774	0,3850	0,4233	0,4318	0,4904	0,5218	0,5305	0,5358	0,5618	0,5979	0,5979	0,6669	0,6825	0,7558	0,7813
	44	0,3429	0,3542	0,3560	0,3651	0,3724	0,3801	0,4189	0,4274	0,4866	0,5182	0,5270	0,5322	0,5585	0,5947	0,5947	0,6641	0,6797	0,7533	0,7789
	60	0,3403	0,3518	0,3535	0,3627	0,3700	0,3778	0,4168	0,4254	0,4848	0,5166	0,5253	0,5306	0,5569	0,5932	0,5932	0,6628	0,6784	0,7521	0,7778
	59	0,3215	0,3336	0,3355	0,3452	0,3528	0,3610	0,4016	0,4105	0,4718	0,5044	0,5133	0,5188	0,5457	0,5827	0,5827	0,6533	0,6692	0,7438	0,7697
	52	0,3208	0,3329	0,3348	0,3445	0,3522	0,3604	0,4010	0,4099	0,4713	0,5039	0,5129	0,5183	0,5452	0,5823	0,5823	0,6530	0,6688	0,7435	0,7694
	96	0,3160	0,3283	0,3302	0,3400	0,3478	0,3561	0,3972	0,4062	0,4680	0,5009	0,5099	0,5153	0,5424	0,5796	0,5796	0,6506	0,6665	0,7414	0,7674
	72	0,3144	0,3267	0,3286	0,3385	0,3463	0,3546	0,3959	0,4049	0,4669	0,4998	0,5089	0,5143	0,5415	0,5787	0,5787	0,6498	0,6658	0,7407	0,7668
	93	0,3104	0,3229	0,3248	0,3348	0,3427	0,3511	0,3927	0,4018	0,4642	0,4973	0,5064	0,5119	0,5391	0,5766	0,5766	0,6479	0,6639	0,7391	0,7651
	48	0,3010	0,3139	0,3159	0,3261	0,3342	0,3429	0,3854	0,3946	0,4580	0,4916	0,5007	0,5063	0,5338	0,5716	0,5716	0,6435	0,6596	0,7352	0,7614
	24	0,2926	0,3058	0,3078	0,3183	0,3266	0,3354	0,3788	0,3882	0,4525	0,4864	0,4957	0,5013	0,5291	0,5672	0,5672	0,6396	0,6558	0,7318	0,7581
	38	0,2810	0,2947	0,2968	0,3077	0,3163	0,3254	0,3699	0,3796	0,4451	0,4795	0,4889	0,4946	0,5228	0,5613	0,5613	0,6343	0,6507	0,7272	0,7537
	27	0,2717	0,2859	0,2881	0,2993	0,3081	0,3175	0,3630	0,3728	0,4393	0,4742	0,4837	0,4895	0,5179	0,5567	0,5567	0,6303	0,6467	0,7237	0,7503
	66	0,2696	0,2839	0,2861	0,2974	0,3063	0,3156	0,3614	0,3712	0,4380	0,4730	0,4825	0,4883	0,5168	0,5557	0,5557	0,6294	0,6459	0,7229	0,7495
	73	0,2694	0,2838	0,2859	0,2972	0,3061	0,3155	0,3613	0,3711	0,4379	0,4729	0,4824	0,4882	0,5167	0,5556	0,5556	0,6293	0,6458	0,7228	0,7495
	94	0,2608	0,2756	0,2778	0,2894	0,2985	0,3082	0,3549	0,3649	0,4327	0,4680	0,4777	0,4835	0,5122	0,5515	0,5515	0,6257	0,6422	0,7197	0,7464
	63	0,2596	0,2744	0,2767	0,2883	0,2975	0,3071	0,3540	0,3640	0,4319	0,4673	0,4770	0,4828	0,5116	0,5509	0,5509	0,6252	0,6417	0,7192	0,7460
	65	0,2504	0,2658	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4721	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7160	0,7429
	39	0,2504	0,2657	0,2681	0,2801	0,2895	0,2994	0,3473	0,3575	0,4265	0,4623	0,4720	0,4779	0,5070	0,5466	0,5466	0,6214	0,6381	0,7159	0,7428
	70	0,2321	0,2486	0,2511	0,2639	0,2738	0,2843	0,3343	0,3450	0,4160	0,4526	0,4626	0,4686	0,4982	0,5385	0,5385	0,6143	0,6311	0,7098	0,7369
	650	0,2255	0,2424	0,2449	0,2580	0,2682	0,2789	0,3298	0,3405	0,4123	0,4493	0,4593	0,4654	0,4952	0,5357	0,5357	0,6118	0,6287	0,7076	0,7348
	620	0,2178	0,2353	0,2379	0,2514	0,2618	0,2728	0,3246	0,3355	0,4082	0,4455	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
	33	0,2177	0,2352	0,2378	0,2513	0,2617	0,2727	0,3245	0,3355	0,4081	0,4454	0,4556	0,4617	0,4917	0,5325	0,5325	0,6090	0,6260	0,7052	0,7325
	23	0,2027	0,2214	0,2242	0,2384	0,2494	0,2608	0,3146	0,3259	0,4003	0,4383	0,4486	0,4548	0,4852	0,5265	0,5265	0,6038	0,6209	0,7007	0,7282
	623	0,2014	0,2202	0,2230	0,2373	0,2484	0,2598	0,3138	0,3251	0,3997	0,4377	0,4480	0,4542	0,4847	0,5260	0,5260	0,6033	0,6205	0,7003	0,7278
	20	0,1912	0,2109	0,2138	0,2287	0,2401	0,2520	0,3074	0,3189	0,3946	0,4331	0,4435	0,4498	0,4805	0,5222	0,5222	0,6000	0,6172	0,6974	0,7250
	31	0,1859	0,2061	0,2091	0,2243	0,2359	0,2480	0,3041	0,3157	0,3921	0,4308	0,4412	0,4475	0,4784	0,5203	0,5203	0,5983	0,6156	0,6960	0,7237
	19	0,1834	0,2038	0,2068	0,2222	0,2339	0,2461	0,3025	0,3142	0,3909	0,4297	0,4402	0,4465	0,4775	0,5194	0,5194	0,5975	0,6149	0,6953	0,7230
	71	0,1706	0,1924	0,1957	0,2118	0,2241	0,2368	0,2950	0,3070	0,3851	0,4244	0,4350	0,4414	0,4727	0,5150	0,5150	0,5938	0,6112	0,6921	0,7199
	62	0,1370	0,1634	0,1672	0,1858	0,1997	0,2138	0,2769	0,2897	0,3714	0,4121	0,4230	0,4295	0,4617	0,5049	0,5049	0,5850	0,6027	0,6846	0,7127

Abbildung 7-11: Empfohlene Instandhaltungsstrategien auf Basis der Kritikalität

In der Abbildung 7-12 ist eine Verteilung der Strategien je Funktionseinheit gegeben. Ein untersuchtes Objekt besteht aus 9 Funktionseinheiten. Das gegebene Budget steigt in Schritten von je 500 € nach rechts an. Die Häufigkeit der Strategien i bis iv ist angetragen, wobei i die beste und iv die schlechteste Strategie im Sinne der Verfügbarkeit darstellt.

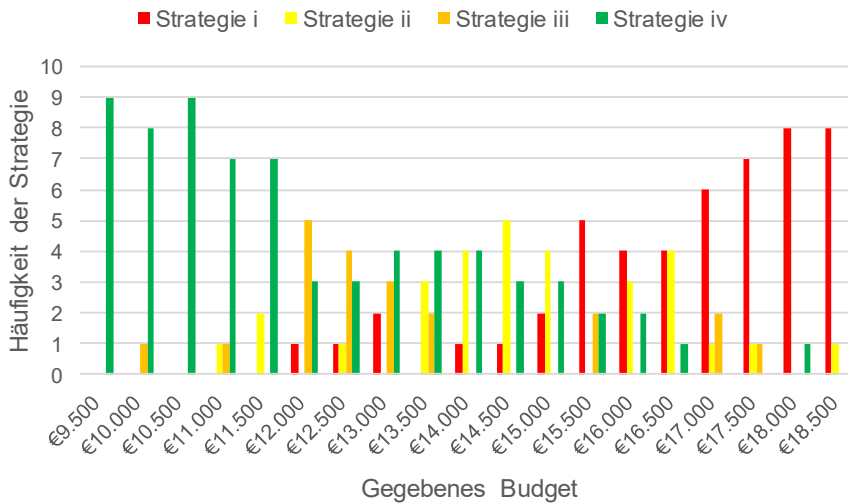


Abbildung 7-12: Häufigkeit der Strategien je Funktionseinheit bei gegebenem Budget

Die Häufigkeit der schlechtesten Strategie fällt mit zunehmendem Budget. Die beste Strategie steigt in ihrer Häufigkeit gleichzeitig an. Die beiden anderen erreichen ihre Maxima dazwischen, die schlechtere bei niedrigerem Budget. Allerdings weisen die Änderungen der Häufigkeiten einer Strategie keine Monotonie auf, da der Strategienmix ein Optimierungsproblem ist.

Die Abbildung 7-13 zeigt die optimierte Strategie als „Mischstrategie“ neben den Strategien i bis iv über einen Zeitraum von 100 Zeiteinheiten, die mit dem Algorithmus in Formel 6-22 ermittelt wurde. Trotz des ähnlichen Bildes der insgesamt fünf Verläufe ist keine strikte Parallelität erkennbar, wenngleich der Trend eindeutig ist. Monetär betrachtet ist die optimierte Strategie zwischen den Strategien ii und iii gelegen, jedoch mit überproportionalem Nutzenverlauf, das bedeutet einen Nutzensgewinn gegenüber Strategie ii.

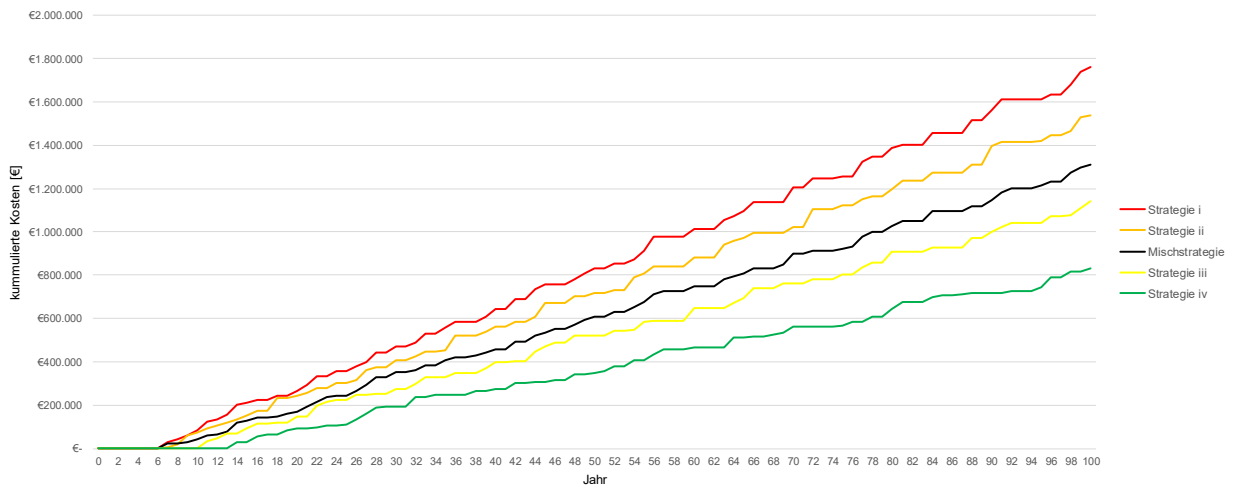


Abbildung 7-13: Resultierende Mischstrategie bei gegebenen Grenzwerten

Steigen die zur Verfügung stehenden Mittel, steigt in der Regel auch die Verfügbarkeit infolge des sinkenden Nutzenverlusts. Eine Möglichkeit diesen sichtbar zu machen, ist die Zuhilfenahme der Kritikalitätsgrenzfunktion $f_k(x)$. Diese Funktion aus Formel 6-31 entspricht der Summe der optimierten, nichttrivialen, Grenzen g_i . Unter den Nebenbedingungen (vgl. Formel 6-27 bis Formel 6-30) wird diese minimiert (vgl. Formel 6-32).

In Abbildung 7-14 lässt sich der Verlauf dieser Kritikalitätsgrenzfunktion $f_k(x)$ bei steigendem Budget zeigen. Der Wert sinkt in der Regel (es herrscht jedoch keine Monotonie, ein Steigen ist möglich und vorhanden, wenn auch in relativ kleinen Werten (siehe Δ_4)) mit steigenden finanziellen Mitteln. Diese negative Steigung ist jedoch über die einzelnen Schritte der Budgetänderung unterschiedlich. Es lassen sich dementsprechend „lohnendere“ Schritte erkennen. So ist der Gewinn bei Δ_1 größer als bei Δ_2 und dieser wiederum größer als bei Δ_3 .

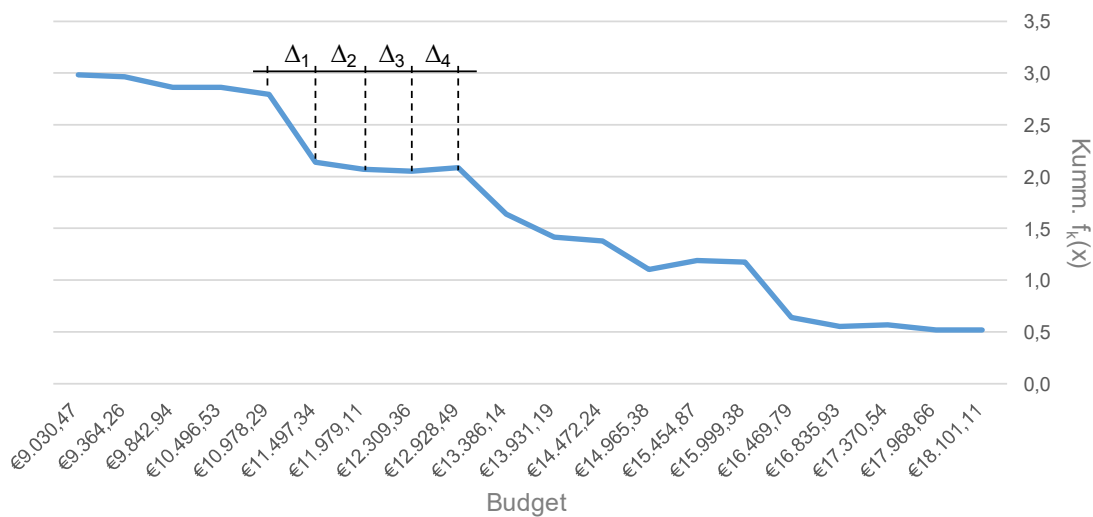


Abbildung 7-14: Verlauf der Kritikalitätsgrenzfunktion in Abhängigkeit von den Investitionen

Mathematisch lassen sich diese als lohnenswerter zu bezeichnenden Intervalle durch die Ableitung der Kritikalitätsgrenzfunktion beschreiben. Dies wurde in Kapitel 6.4.1.2 und dort insbesondere in Abbildung 6-50 gezeigt. Praktisch betrachtet können damit jene finanziellen Mittel identifiziert werden, die besser in die nächste oder übernächste Periode verschoben werden, da der kumulierte Nutzensgewinn über die Perioden hinweg größer ist.

7.5 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgestellten vier Bereiche sind miteinander verknüpft. Daraus ergibt sich ein Modell, bzw. das Modell der Arbeit. Mit der Abbildung 7-16 ist der Gesamtüberblick abgebildet.

Die Hierarchien aus der Vernetzungsanalyse und der Nutzenberechnung vereinen sich in der Kritikalitätsbetrachtung und fließen in die Instandhaltungsplanung ein. Ergebnis ist sodann eine

Handlungsempfehlung zur Instandhaltung auf Basis ökonomischer und einzelwirtschaftlicher Bedeutung in Form einer abgeleiteten Mischstrategie S_M .

Dabei folgt die Handlungsempfehlung der Maxime, dass effiziente Instandhaltung nicht zwingend als eine Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage bzw. das gesamte Objekt verstanden werden soll, sondern als eine Mischung aus der jeweils effizienten Strategie je Betrachtungseinheit (und damit Funktionseinheit), deren Summe erst die Anlage bzw. das Objekt darstellt.

Das Modell ist ein in sich geschlossenes System, mit nur wenigen Verbindungspunkten nach außen. Vom Anwender, der für die Maßnahmen des Unterhalts verantwortlich ist, wird lediglich Kompetenz in der Kommunikation des Modells nach außen, d. h. in Bezug auf die Eingabeparameter, erwartet. Eine Notwendigkeit der Kenntnis der mathematischen Zusammenhänge liegt nicht vor. Die Eingabeparameter für die Nutzenberechnung beschränken sich auf den Datensatz der Zählstellen und deren Information, der Verkehrszusammensetzung sowie die Kostenkennwerte zur Beschreibung volkswirtschaftlicher Effekte. Über einen bestimmten Zeitraum hinweg müssen diese gegebenenfalls angepasst bzw. aktualisiert werden. Die Vernetzungsanalyse ist in sich geschlossen. Die Modellannahmen und -grenzen unterliegen keinen Änderungen. Das gleiche gilt für die Kritikalitätsbestimmung. Für gleiche Ausschnitte sind nur die Ergebnisse der Nutzenberechnung und der Vernetzungsanalyse relevant. Das betrifft die beiden Hierarchien. Die Ableitung der Instandhaltungsplanung ist von den Instandhaltungsstrategien abhängig. Hier wurden vier Strategien aus der Literatur und den Normen berücksichtigt. Externe Inputgröße ist in diesem Bereich die Vorgabe eines Managements bzw. des Unternehmens, welches für die Instandhaltung verantwortlich ist, entweder hinsichtlich der Grenzen direkt oder hinsichtlich der Budgetierung.

Auf Basis der internen und externen Variablen ermittelt das Modell die optimierte Instandhaltungsstrategie für das Objekt. Diese ist zugleich Handlungsempfehlung für das Management, welches die direkten bzw. indirekten Vorgaben gemacht hat.

Diese Handlungsempfehlung soll die Antwort auf die in Kapitel 1 von Jochimsen gestellte Frage sein, nach dem sozioökonomisch wie auch einzelwirtschaftlich zweckmäßigen Wirtschaftlichkeitskriterium für die Rangfolge der Investitionen, die im Bereich der materiellen Infrastruktur vorgenommen werden sollen.

Die Handlungsempfehlung lässt sich zudem als eine „Triage für Instandhaltung“ darstellen. Abbildung 7-15 stellt die Instandhaltung exemplarisch für die Straßeninfrastruktur der Bundesautobahnen 3, 5, 1 und 7 dar und folgt dabei der Darstellungsform einer Triage.

		Handlungsempfehlung			
		1 Vorausbestimmte Instandhaltung	2 Zustandsbestimmte Instandhaltung	3 Sofortige Instandhaltung	4 Aufgeschobene Instandhaltung
Bundesautobahn	3	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4 Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2 Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6	Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7		
	5	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4 Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2	Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7		
	1	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4	Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2 Funktionseinheit 9	Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12 Funktionseinheit 7	
	7	Funktionseinheit 1 Funktionseinheit 5 Funktionseinheit 4	Funktionseinheit 8 Funktionseinheit 3 Funktionseinheit 2	Funktionseinheit 9 Funktionseinheit 6 Funktionseinheit 11 Funktionseinheit 10 Funktionseinheit 12	Funktionseinheit 7

Abbildung 7-15: „Triage für Instandhaltung“ am Beispiel der BAB 3, 5, 1, 7

Die rot dargestellten Funktionseinheiten sind, in Abhängigkeit von der Bundesautobahn, der sie angehören, als besonders kritisch anzusehen, da ihr Kritikalitätsmaß so hoch ist, dass es über dem größten nichttrivialen Grenzwert g_3 liegt. Hier wird dementsprechend die Instandhaltungsstrategie empfohlen, welche die höchste Verfügbarkeit der Funktionseinheit gewährleistet. Die orange dargestellten Funktionseinheiten befinden sich im Intervall der Grenzwerte g_2 und g_3 , was dem zweithöchsten Bereich entspricht. Die empfohlene Instandhaltungsstrategie für diese Funktionseinheiten entspricht entsprechend der zweiten im Sinne der Zuverlässigkeit. Analog wird für die gelb dargestellten Funktionseinheiten im Bereich zwischen g_1 und g_2 , dem dritthöchsten Bereich, die drittzuverlässigste empfohlen und für den grünen Bereich, unterhalb des Grenzwertes g_1 , die viertzuverlässigste.

Die Darstellung, wie sie in Abbildung 7-15 gewählt wurde, zeigt immer nur einen Ausschnitt des Gesamtnetzes. In einem konkreten Untersuchungsfall steht es dem Anwender offen, seinen Untersuchungshorizont selbst zu wählen. Im Bereich der Bundesautobahnen wurde so bspw. das Gesamtnetz untersucht. Mit der Instandhaltung als Aufgabe des Bundes, ist diese Vorgehensweise folgerichtig, da sie die Allokation der Mittel für das gesamte Aufgabengebiet vornimmt.

Gibt der Staat nun die Aufgabe der Verwaltung in die Auftragsverwaltung durch die Länder, die nach Landesrecht zuständigen Selbstverwaltungskörperschaften (vgl. Art 143e (1) GG) oder in eine Gesellschaft privaten Rechts (vgl. Art 90 (2) GG), so können diese ihr geographisches Hoheitsgebiet bzw. ihr verantwortetes Gebiet der Untersuchung zugrunde legen.

Dieses Vorgehen lässt sich für die Planung des Erhalts der Infrastrukturanlagen beliebig fortführen. So lässt sich die Methodik auch auf untergeordnete Straßennetze oder andere Infrastruktursparten wie die Wasserver- und -entsorgung anwenden. Hier können kommunale Netze Untersuchungsgegenstand werden und die Randpunkte das Netz entsprechend beschreiben. Solange der Nutzen auf der einen Seite sowohl quantifizierbar als auch bewertbar ist und die zugrundeliegenden Objekte auf der anderen Seite in Untersuchungseinheiten (wie bspw. Funktionseinheiten) im Sinne der Vernetzungsanalyse zerlegbar sind, kann die hergeleitete Methodik angewandt werden. In der Praxis besteht die Herausforderung darin, Informationen, welche diese Möglichkeiten beschreiben, zu erhalten. Während sie für die Bundesfernstraßen durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) frei zugänglich zur Verfügung stehen, müssen sie in anderen Infrastruktursparten ggf. überhaupt erst erhoben werden.

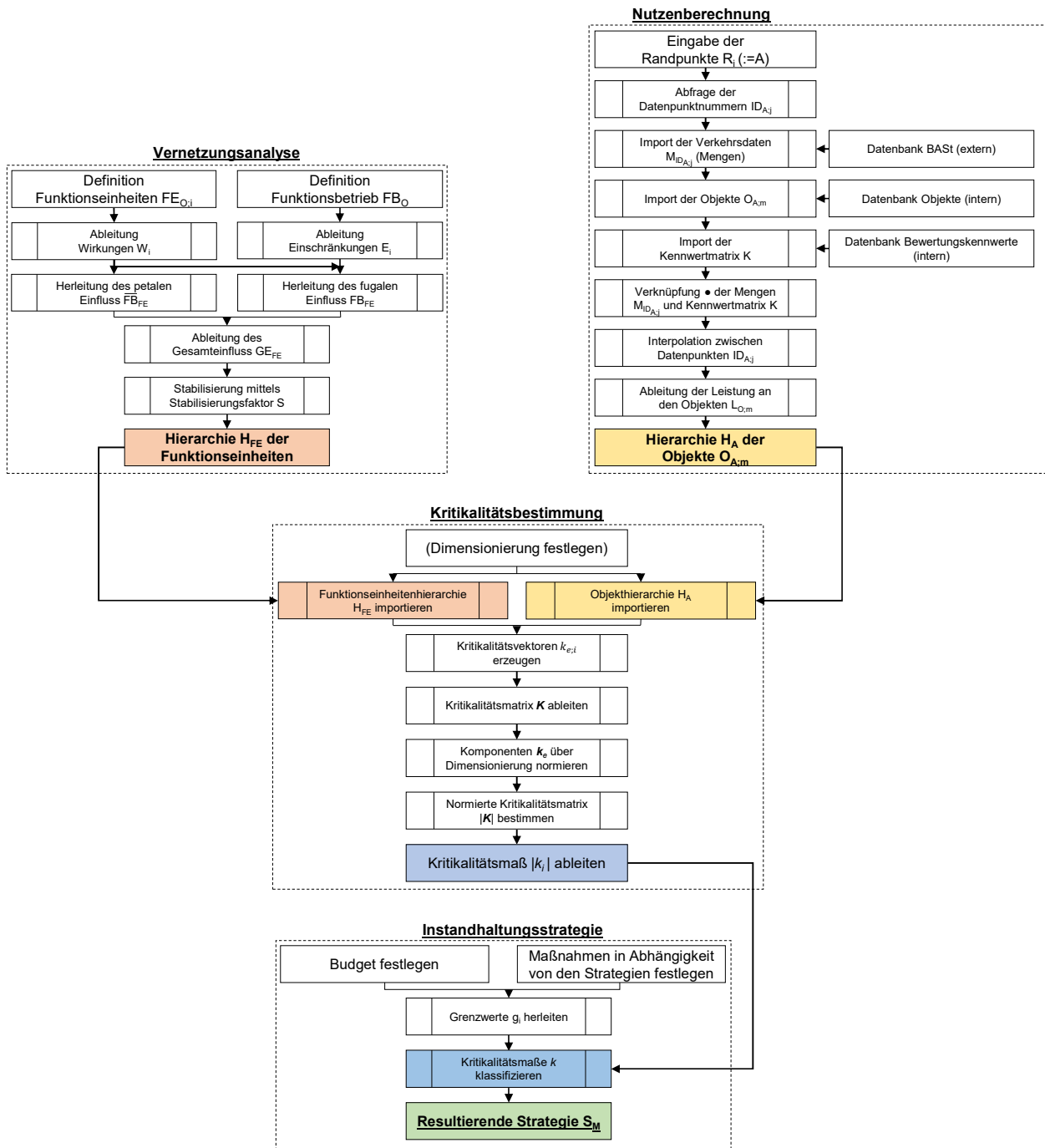


Abbildung 7-16: Gesamtablauf über alle Teilbereiche

8 Schlussbemerkungen

8.1 Zusammenfassung

In Kapitel 1 wurde das Ziel gesetzt, ein sozioökonomisch wie auch einzelwirtschaftlich zweckmäßiges Wirtschaftlichkeitskriterium zu finden, welches herangezogen werden soll, um die zeitliche und sachliche Rangfolge der Investitionen, die im Bereich der materiellen Infrastruktur und der direkt produktiven Tätigkeiten vorgenommen werden sollen, zu ordnen.

Diese Forderung nach einer Rangfolge zum Tätigen der Investitionen wurde durch eine ordinale Beziehung zwischen den Funktionseinheiten der untersuchten Objekte vor dem Hintergrund ihrer selbst sowie dem Hintergrund der wirtschaftlichen Bedeutung erreicht. Als Schlüsselkomponente wurde dazu das Kritikalitätsmaß eingeführt. Dabei handelt es sich um einen Wert, der jeder Funktionseinheit in Abhängigkeit von ihrer Bedeutung und der Bedeutung des Objektes, dem sie angehört, zugeordnet wird. Dieses Maß, die individuelle Kritikalität, lässt sich dann mit den Werten anderer Funktionseinheiten vergleichen.

Kritikalität ist als Begriff der Zuverlässigkeitssystemtechnik bekannt. Auch in der Kernphysik, dem IT-Management sowie der Luft- und Raumfahrttechnik ist er bekannt. Der Begriff selbst wird weitläufig verwendet und ist weder definiert noch geschützt. Es handelt sich um einen sehr allgemeinen Begriff, der letztlich schlicht die Wichtigkeit von etwas ausdrückt.

Im Rahmen der Arbeit wurde er definiert als jene Bedeutung, die aus der Verknüpfung aus der Wechselwirkung aus dem Umfeld der Funktionseinheiten auf der einen Seite und der Bedeutung des Objektes (dem die Funktionseinheit angehört) für Volkswirtschaft auf der anderen Seite, einhergeht.

Zur Lösung der Forderung wurde sowohl eine Methodik zur Beschreibung der Vernetzung als auch zur Beschreibung des Nutzens hergeleitet. Zudem wurde eine Methodik erarbeitet, welche die definierte Kritikalität ableitet und auf die Instandhaltung anwendet. Auf diesen Ergebnissen aufbauend wurde im Rahmen der praktischen Umsetzung ein Modell erzeugt, welches primär der genannten Forderung der Allokation nachkommen soll. Darüber hinaus sind verschiedene weitere Aufgaben lösbar, wie anhand von Beispielen gezeigt wurde. Dazu gehören die Messung des Nutzens und des Schadens expliziter Sachverhalte, die Planung der Instandhaltung in Abhängigkeit von finanziellen Mitteln, die Planung und Quantifizierung der Instandhaltung in Abhängigkeit von gegebenen Grenzen und eine Möglichkeit der Szenarienanalyse hinsichtlich Zeit, Kosten und Nutzen.

Auch der gefolgerte Schluss im Rahmen der Instandhaltung, dass effiziente Instandhaltung nicht zwingend eine Instandhaltungsstrategie für die gesamte Anlage bzw. das gesamte Objekt ist, sondern eine Mischung aus der jeweils effizienten Strategie je Betrachtungseinheit, deren

Ganzes die Anlage bzw. das Objekt darstellt, wurde im Rahmen der Kritikalitätsbewertung zugrunde gelegt.

Die vier unterschiedlichen untersuchten Instandhaltungsstrategien können als vier Stufen einer Handlungsempfehlung verstanden werden. Die Stufen entsprechen den unterschiedlichen Möglichkeiten bzw. Strategien. Diese lassen sich um eine fünfte Stufe erweitern. In der Instandhaltung würde in diesem fünften Fall der Funktionsbetrieb aufgegeben werden. Das ist der Fall, wenn kein Bedarf besteht und ein Infrastrukturobjekt dementsprechend nicht nachgefragt wird. Eine Brücke, über die niemand fährt, bedarf keiner Instandhaltung. Dem muss rechtlich jedoch die Aufgabe des Bauwerks vorausgehen.

Es wurde gezeigt, dass das entwickelte Modell in der Lage ist, die Instandhaltung effizient zu planen, indem eine resultierende Mischstrategie entwickelt wird, welche die unterschiedlichen Instandhaltungsstrategien einzelnen Funktionseinheiten zuordnet, sodass der Gesamtnutzen unter Berücksichtigung der entsprechenden Parameter, bspw. des Budgets, maximiert wird.

Während Methoden und Modell am Beispiel der Bundesautobahnen aufgrund der Informationslage hergeleitet wurden, wird auf die Anwendung außerhalb der Bundesautobahnen explizit hingewiesen. So liegt bspw. eine Betrachtung der Eisenbahninfrastruktur nahe. Aber auch kleine, kommunale Netze können solcherart betrachtet werden. Jedoch muss hier ggf. erst mit der Einrichtung von Messeinrichtungen begonnen und die Messung anschließend durchgeführt werden.

Eine Ausweitung der Anwendung im Bereich der sozialen Infrastruktur ist ebenfalls denkbar. Hierbei handelt es sich vor allem um jene Sparten, die nicht als Netz-, sondern als Punktinfrastrukturen ausgebildet werden, wie Einrichtungen zur Erziehung, Bildung, Forschung, Verwaltung, Gesundheit und Kultur. Parameter wie Anzahl Schüler/Studierende/Patienten, Abschlüsse und Qualität können herangezogen werden, um den Funktionsbetrieb zu quantifizieren.

8.2 Ausblick

In der Arbeit wurde ein grundlegendes Konzept entwickelt, das eine zweidimensionale Betrachtung anwendet. Zum einen wird die Infrastruktur selbst betrachtet, zum anderen das Objekt. Diese Ansichtweise lässt sich auch auf andere Bereiche anwenden.

In der klassischen Immobilienwirtschaft aus betriebswirtschaftlicher Sicht werden Immobilien als Renditeobjekte verstanden. Die Rendite als betriebswirtschaftliche Kenngröße wurde in dieser Arbeit als Nutzen und somit als volkswirtschaftliche Größe interpretiert. Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Infrastruktur selbst wurde abhängig vom Einfluss ihres Nichtvorhandenseins auf ihr Umfeld gemacht. Dabei ist die Lage entscheidend, ebenso wie die Lage der Alternativen.

Für die Immobilienwirtschaft mit der Absicht einer Gewinnerzielung lässt sich dieses Vorgehen adaptieren. So lässt sich die Lage der Immobilie untersuchen und die Bedeutung der Lage für ihr Umfeld bewerten.

Im zweiten Schritt untersucht man das Objekt selbst. Jede Immobilie besteht aus Funktionseinheiten, die für den Funktionsbetrieb essentiell sind. Im Rahmen des Objektbetriebs wird nun die Instandhaltungsstrategie so gewählt, dass Instandhaltungen an Einheiten priorisiert werden, die verhältnisbezogen einen höheren Einfluss auf die Zahlungsbereitschaft der Mieter/Nutzer haben als andere.

Qualitativ betrachtet bedeutet das, ein Investor würde zuerst dort investieren, wo es sich am stärksten für ihn „lohnt“. Betrachtet man wie hier den Investitionsstandort vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Bedeutung des Standorts, wird er eine Investition mit solidem Rendite-Risiko-Profil wählen, vor allem aber mit unterdurchschnittlichem Risiko. Mit hoher wirtschaftlicher Bedeutung eines Standorts geht ein geringes Risiko einher, wenngleich die Rendite geringer sein wird als an risikoreicheren Standorten. Den Preis seiner Investition wird er in diesem Fall aber nicht beeinflussen können.

Diese Unbeeinflussbarkeit kann er anschließend rückwirkend beeinflussen, indem er die notwendigen Investitionen, die während der Nutzungszeit anfallen, vor dem Hintergrund der Renditeerwartung optimiert. Für jede aufgewendete Geldeinheit wird versucht, den maximalen positiven Einfluss auf den zukünftigen Erlös zu erzeugen, unabhängig davon, ob es sich um Mieteinnahmen oder einen Veräußerungserlös handelt.

Kritikalität bedeutet demzufolge die Bedeutung für den Nutzen der Funktionseinheiten als Auswirkung auf die Rendite(-erwartung) für eine Immobilie, die rechtlich neben dem Objekt auch das Grundstück umfasst, das unter anderem und speziell durch seine Lage charakterisiert wird.

Der erste Teil des Konzepts kann losgelöst vom zweiten betrachtet werden. Dabei wird das Objekt als solches vor der Gesamtheit betrachtet. Diese Betrachtung ist immer dann interessant, wenn nach der Bedeutung gefragt wird. Das kann wie angesprochen der Fall sein, wenn ein Risiko betrachtet werden soll. Dabei kann das Risiko aus verschiedenen Gründen interessant sein, sei es, um die Notwendigkeit des Objektbetriebes zu betrachten wie in der Infrastruktur oder um die Vermietbarkeit einer Immobilie zu hinterfragen.

Der zweite Teil des Konzeptes dieser Arbeit, eine effiziente Instandhaltung eines gegebenen Objektes anzustreben, kann auch losgelöst vom ersten erfolgen. Jeder Besitzer eines beliebigen Objektes (ausgenommen Luxusobjekte) wird interessiert sein, den Nutzen, den ihm das Objekt stiftet, gegenüber den Kosten, die es erzeugt, zu maximieren.

8.3 Empfehlungen für weiteren Forschungsbedarf

In der vorliegenden Arbeit wurde der Verkehr makroskopisch betrachtet. Das ist innerhalb der Daten auf Basis der BAST möglich. Die makroskopische Betrachtung lässt sich dabei noch ausweiten und um verschieden tiefe Simulationen ergänzen. Vollständige makroskopische Simulationen der Verkehrsabläufe sind ein Gebiet der Verkehrstechnik und der Informatik und können dazu beitragen, noch bessere Ergebnisse zu liefern, da diese in der Lage sind, die Beeinflussung des Verkehrs durch sich selbst wesentlich genauer zu beschreiben. Nichtsdestotrotz reichen die aufgezeigten Bewertungsmethoden aus, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, eine ordinale Ordnung ist möglich und wird als vollkommen ausreichend angesehen. Dennoch würde eine Möglichkeit der kardinalen Ordnung weitere Aussagen ermöglichen.

Darüber hinaus kann die Detailtiefe noch weiter erhöht werden, wenn auf eine mikroskopische Simulation der Verkehrsabläufe zurückgegriffen würde. Auch hierbei handelt es sich um eine Disziplin der Verkehrstechnik. Dabei würden die Objekte des Verkehrs vollkommen bekannt und transparent. Aussagen hinsichtlich Ort und Lage, Zeit, Geschwindigkeit, etc. würden uneingeschränkt vorliegen. Eine solche Betrachtung ist jedoch innerhalb der BAST-Daten nicht möglich, auch andere Quellen sind nicht in der Lage, solche zu liefern. Ebenso wie Simulationen auf mikroskopischer Ebene für makroskopische Gebiete nicht möglich sind. Für den praxisorientierten Teil der Arbeit wurde somit mit praxisrelevanten Daten (makroskopischen) gearbeitet. Für einen eher theoretischen Ansatz könnte mit theoretischen bzw. simulierten Daten (mikroskopischen) gearbeitet werden.

Im Weiteren sollte nun die ordinale Beziehung, wie sie in der Arbeit generiert wurde, um einen kardinalen Aspekt erweitert werden. Dadurch wird die Effizienz, die bisher vor dem volkswirtschaftlichen Hintergrund untersucht wurde, um den betriebswirtschaftlichen erweitert. Der Staat, der bisher als Institution behandelt wurde, wird dann auch als Unternehmer betrachtet. Vereint man beide Ansichten, kann der Staat letzten Endes als Dienstleister verstanden werden, der die Funktion seiner Kosten als gesamtwirtschaftliche Aufgabe sieht und sie vor dem Nutzen, den ihre Träger ihm und der Volkswirtschaft stiften, optimiert.

Dies zeigt sich insbesondere bei der Verknüpfung der sozioökonomischen und einzelwirtschaftlichen Betrachtung. Das Kritikalitätsmaß, welches die Bedeutungen zusammenfassend darstellt, wurde als Grundlage für die Instandhaltung angewendet. Aus volkswirtschaftlicher Sicht sind die ordinalen Aussagen richtig und wertvoll. Erst durch Berücksichtigung der betriebswirtschaftlichen Kenngrößen, allen voran der Kosten, können die Grenzen innerhalb der Bandbreite des Kritikalitätsmaßes eindeutig bestimmt werden. Dadurch lässt sich langfristig das bereits in Kapitel 1 geforderte gesamtwirtschaftliche System, in dem der Staat als Dienstleister auftritt, etablieren.

Glossar

Abnutzungsvorrat	Potential, welches einer Betrachtungseinheit innewohnt. Dieser wird zur Erfüllung seiner Funktion verwendet und gewährleistet diese unter festgelegten Bedingungen bezüglich der beabsichtigten Nutzungsart und Nutzungsintensität. Unterschreitet das Potential einen gewissen Wert, kann die Funktionalität nicht mehr weiter aufrechterhalten werden.
Ausfallbedeutung (<i>pondus defectus</i>)	Bedeutung eines konkreten Ausfallereignisses (<i>res defecto</i>). Wird durch das Ergebnis der Bildung der Differenz zwischen Soll (<i>Status quo ante rei</i>) und Ist (<i>Status quo post rei</i>) gebildet.
Ausfallereignis (<i>res defecto</i>)	Konkretes Ereignis, welches zum Ausfall einer betrachteten Funktionseinheit führt. Voraussetzung für die Bewertung der Umstände infolge eines Ausfalls.
Einzelwirtschaftliche Betrachtung	Betrachtet die einzelnen Funktionseinheiten des Objektes und deren Bedeutung untereinander, aufeinander und gegenüber dem Funktionsbetrieb selbst. Sie lässt sich in den (systemimmanenten) petalen und fugalen Teil teilen.
Fugaler Einfluss	Jener Einfluss, der aus der Wirkung der Funktionseinheiten selbst in direkter Weise auf den Funktionsbetrieb entsteht.
Funktionsbetrieb	Die eigentlichen Geschäftsprozesse der Nutzung des Objektes. ³⁵⁵ Im Falle der Verkehrsinfrastruktur entspricht der Funktionsbetrieb der Nutzung durch die Verkehrsteilnehmer.
Funktionseinheit	Teil, Bauelement, Gerät, Teilsystem, Betriebsmittel oder System, das/die für sich allein beschrieben und betrachtet werden kann. (DIN 31051) Einheit aus mindestens einem Teil, die eine Funktion abgrenzt. Die Summe der Funktionseinheiten ergibt das Objekt, welches die Grundlage für den Funktionsbetrieb darstellt.
Infrastruktur	„Infrastruktur wird als Summe der materiellen, institutionellen und personellen Einrichtungen und Gegebenheiten definiert, die den Wirtschaftseinheiten zur Verfügung stehen und mit beitragen, den Ausgleich der Entgelte für gleiche Faktorbeiträge bei zweckmäßiger Allokation der Ressourcen [...] zu ermöglichen.“ ³⁵⁶

³⁵⁵ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 10.

³⁵⁶ Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966).

Instandhaltung	Unter Instandhaltung versteht die DIN 13306 wie auch die DIN 31051 die Summe sämtlicher Maßnahmen während der tatsächlichen Lebensdauer einer Einheit, die dafür Sorge tragen, dass die Einheit ihre Funktion erfüllen kann. ³⁵⁷
Instandhaltungsstrategie(n)	Die Instandhaltungsstrategie beschreibt jene Vorgehensweise, die das Management zum Erreichen der Instandhaltungsziele ausführt. ³⁵⁸ Es handelt sich um die übergeordneten Randbedingungen zur Ausführung von Instandhaltungsmaßnahmen an einer den Betrachtungseinheiten übergeordneten Einheit innerhalb ihrer wirtschaftlichen Lebensdauer.
Kritikalität, (im Kontext der Arbeit)	Bedeutung einer Einheit verknüpft mit ihrer Umgebung (dem Objekt) auf das gesamtwirtschaftliche System, ausgedrückt in Korrelation mit dem Nutzenverlust bzw. Schaden im Falle einer Fehlfunktion.
Kritikalität, allgemein	Relatives Maß für die Bedeutsamkeit einer Infrastruktur in Bezug auf die Konsequenzen, die eine Störung oder ein Funktionsausfall für die Versorgungssicherheit der Gesellschaft mit wichtigen Gütern und Dienstleistungen hat.
Kritikalitätsgrenzfunktion $f_k(x)$	Funktion, welche die Instandhaltungsstrategien den Funktionseinheiten in Abhängigkeit vom Kritikalitätsmaß unter Berücksichtigung der Grenzen zuordnet.
Kritikalitätsgrenzkostenfunktion $f_{kg}(x)$	Funktion, welche die Instandhaltungskosten des aus der Kritikalitätsgrenzfunktion abgeleiteten Strategiemix addiert.
Kritikalitätsmaß	Wert der Kritikalität im Intervall zwischen 0 und 1, das die Kritikalität der Funktionseinheit im Umfeld der betrachteten Objektgruppe wiedergibt.
Kritische Infrastruktur	Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden. ³⁵⁹

³⁵⁷ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Begriffe der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), 2.1; bzw. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), 4.1.1.

³⁵⁸ Vgl. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.: *Grundlagen der Instandhaltung* (Berlin: Beuth Verlag GmbH), S. 5 Punkt 2.4.

³⁵⁹ Bundesministerium des Innern: *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen* (Berlin, 2009), S. 3.

Leistung (Kontext der Arbeit)	Kennwert, der Menge und Zusammensetzung des Verkehrs ausdrückt. Er berücksichtigt verschiedene Kostenkennwerte in Abhängigkeit vom Verkehr hinsichtlich Betriebskosten und Zeitkosten. Mit seiner Hilfe kann der Nutzen im Betrachtungspunkt ordinal bewertet werden.
Makroskopische Modelle	Bilden den Verkehr nur in seiner Masse ab, einzelne Einheiten (Fahrzeuge) werden nicht betrachtet. Sie erlauben Aussagen über den Verkehrsfluss. Angewendet werden sie in großen Verkehrsnetzen wie dem deutschen Autobahnnetz.
Materielle Infrastruktur	Anlagen, Ausrüstungen und Betriebsmittel, die zur Energieversorgung, Erfüllung der Verkehrsbedienung und Telekommunikation dienen sowie die Bauten zur Konservierung der natürlichen Ressourcen, dabei vor allem jene der Gewässerhaltung, zu denen unter anderem die stoffliche Ver- und Entsorgung gehören. ³⁶⁰
Mikroskopische Modelle	Bilden einzelne Einheiten (Fahrzeuge) mit ihrer individuellen Charakteristik ab. Angewendet werden sie in kleinen Untersuchungsgebieten (aufgrund des hohen Rechenaufwandes).
Nutzen	Der gesamtwirtschaftliche Nutzen der Individuen einer Volkswirtschaft als ökonomische Wohlfahrt ist definiert als Summe der Konsumentenrente und der Produzentenrente. ³⁶¹ Diese Summe wird auch Wohlfahrt genannt (oder sozialer Überschuss ³⁶²).
Objekt	Das Objekt beschreibt im Bauwesen das Bauwerk und die für dessen Realisierung erforderlichen objektspezifischen Aufgaben. ³⁶³
Objektbetrieb	Die Bewirtschaftung sowie die Finanzierung des Objektes. ³⁶⁴ Im Falle der (Verkehrs-)Infrastruktur Aufgabe der öffentlichen Hand und ihrer Erfüllungshilfen.
Petaler Einfluss	Systemimmanenter Einfluss, der durch die Funktionseinheiten selbst bzw. deren Wechselwirkung untereinander entsteht. Die Bewertung ist primär von der geometrischen Beschaffenheit des Objektes abhängig.

³⁶⁰ Vgl. Jochimsen, Reimut: *Theorie der Infrastruktur* (Tübingen: Mohr, 1966), S. 103.

³⁶¹ Vgl. Weizsäcker, Robert K. Frhr. von: *Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik, TU München, 2013), S. 19.

³⁶² Vgl. Mühlenkamp, Holger: *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen* (Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015), S. 179.

³⁶³ Vgl. Greiner, Peter; Mayer, Peter E; Stark, Karlhans: *Baubetriebslehre – Projektmanagement: Wie Bauprojekte erfolgreich gesteuert werden*, 3., aktualisierte Auflage (Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005), S. 1.

³⁶⁴ Vgl. Zimmermann, Josef: *Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation* (Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung, TU München, 10/2017), S. 10.

Sozioökonomische Betrachtung	Bewertet den volkswirtschaftlichen Nutzen, der an einem untersuchten Objekt verübt wird. Die Bewertung findet über den Verkehr statt, der über das Objekt abgewickelt wird.
Vernetzungsanalyse	Disziplin der Systemtheorie bzw. Kybernetik. Sie ermöglicht es, Elemente (oder auch Elementgruppen bzw. Teilsysteme) in eine Beziehung zueinander zu setzen. Dadurch lassen sich komplexe Systeme abbilden und analysieren. Komplexe Systeme sind, im Gegensatz zu komplizierten Systemen, nur bedingt vorhersehbar. Sie erfordern einen Ansatz ganzheitlicher Betrachtung. ³⁶⁵
Wirtschaftliche Bedeutung	Entspricht dem <i>Status quo ante rei</i> , d. h. sie bewertet den ungestörten Funktionsbetrieb anhand des tatsächlichen Verkehrs.

³⁶⁵ Vgl. Thommen, Jean-Paul: *Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*, 8., überarb. und erw. Aufl. (Zürich: Versus, 2008), S. 40.

Literaturverzeichnis

- Ahrendt; Rahm; Moebus:** „Bericht über die Plausibilisierung der Investitionskosten von Straßenbauprojekten zur Aufstellung des Bundesverkehrswegeplans 2030: Bericht an den Haushaltsausschuss des Deutschen Bundestages nach § 88 Abs. 2 BHO.“
- Alfen Consult GmbH, AVISO GmbH, BUNG Ingenieure AG:** *Berechnung der Wegekosten für das Bundesfernstraßennetz sowie der externen Kosten nach Maßgabe der Richtlinie 1999/62/EG für die Jahre 2018 bis 2022.* Weimar, Leipzig, Aachen, Münster, Köln, 2018.
- Bardt, Hubertus; Chrischilles, Esther; Fritsch, Manuel; Grömling, Michael; Puls, Thomas; Röhl, Klaus-Heiner:** *Die Infrastruktur in Deutschland: Zwischen Standortvorteil und Investitionsbedarf.* IW-Analysen 95. Köln: Inst. der Dt. Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2014.
- Barfod, Charlotte; Lauritzen, Marlene M. P; Danker, Jakob K; Sölétormos, György; Forberg, Jakob L; Berlac, Peter A; Lippert, Freddy; Lundstrøm, Lars H; Antonsen, Kristian; Lange, Kai H. W.:** *Abnormal vital signs are strong predictors for intensive care unit admission and in-hospital mortality in adults triaged in the emergency department – a prospective cohort study* 20. 2012. doi:10.1186/1757-7241-20-28.
- Bauer, Rudolph:** *Personenbezogene Soziale Dienstleistungen: Begriff, Qualität und Zukunft.* Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2001. doi:10.1007/978-3-322-91616-7.
- Baum, Herbert; Kranz, Thomas; Westerkamp, Ulrich:** *Volkswirtschaftliche Kosten durch Straßenverkehrsunfälle in Deutschland.* Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen: M, Mensch und Sicherheit 208. Bremerhaven: Wirtschaftsverl. NW Verl. f. Neue Wiss, 2010.
- Becker, Fred G. (H.):** *Einführung in die Betriebswirtschaftslehre: Mit 34 Tabellen.* BWL im Bachelor-Studiengang. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.
- Bertram, Klaus; Brinkmann, Ralph; Kessler, Harald; Müller, Stefan:** *Haufe HGB Kommentar: [§§ 238 - 342e HGB].* Version 1. Freiburg im Brsg.: Haufe, 2009.
- Bleifuß, Mariana:** „Prognose von Lebenszykluskosten bei Hotelimmobilien.“ Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung TU München, 2009.
- Blohm, Dieter:** *Wohlfahrtsökonomik.* Gabler Studentexte. Wiesbaden: Gabler Verlag; Imprint: Gabler Verlag, 1980.
- Blöß, Timo:** „Zwang zur Selektion.“ *Deutsches Ärzteblatt* 101, Nr. 33 (2004): A2216-A2218; Katastrophenmedizin.
- Brech, Alexander:** *Triage und Recht: Patientenauswahl beim Massenanfall Hilfebedürftiger in der Katastrophenmedizin. Ein Beitrag zur Gerechtigkeitsdebatte im Gesundheitswesen.* 1. Aufl. Schriften zum Gesundheitsrecht 11. Berlin: Duncker & Humblot, 2008. Zugl.: Leipzig, Univ., Diss., 2007.
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe; Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI):** „Nationale Strategie zum Schutz Kritischer Infrastrukturen (KRITIS-Strategie).“ 20.11.2017.

- Bundesanstalt für Straßenwesen:** *Automatische Zählstellen*. 2016. Zuletzt geprüft am 16.11.2017.
- Bundesanstalt für Straßenwesen:** *Verkehrsentwicklung auf Bundesfernstraßen 2014*. Unter Mitarbeit von Arnd Fitschen und Hartwig Nordmann. Bergisch Gladbach, 2016.
- Bundesanstalt für Straßenwesen:** „Pavement Management System (PMS).“ Zuletzt geprüft am 24.05.2019.
https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Strassenbau/Fachthemen/g3-pms.html;jsessionid=24EC794B86E6C59D546A02D7CDD7881B.live21303?nn=1497044#Start.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz,** *Verordnung über die Grundsätze für die Ermittlung der Verkehrswerte von Grundstücken*. ImmoWertV.
- Bundesministerium des Innern:** *Arbeitshilfe zur Gesetzesfolgenabschätzung*. Berlin, 2009.
https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/downloads/DE/themen/verfassung/gesetzgebung/arbeitshilfe-gesetzesfolgenabschaetzung.pdf;jsessionid=06D8970B1A527DA75192847B8E68BCE2.2_cid287?__blob=publicationFile&v=2.
- Bundesministerium des Innern:** *Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen*. Berlin, 2009.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit,** *Wertermittlungsrichtlinien*. WertR. 2006.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Bundeshaushaltsplan 2014 – Einzelplan 12*. Berlin, 2014. Zuletzt geprüft am 18.12.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2012: Unterrichtung durch die Bundesregierung*. Berlin, 2014. Drucksache. Nr. 18/580.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Bundeshaushaltsplan 2015 – Einzelplan 12*. Berlin, 2015. Zuletzt geprüft am 18.12.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Bundeshaushaltsplan 2016 – Einzelplan 12*. Berlin, 2016. Zuletzt geprüft am 18.12.2017.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Bundesverkehrswegeplan 2030*. Berlin, 2016.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Verkehr in Zahlen 2016/17*. 44., aktualisierte Neuauflage, revidierte Ausgabe. Hamburg: DVV Media Group, 2016.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Verkehrsinvestitionsbericht für das Berichtsjahr 2014*. Berlin, 2016.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** „Bekanntmachung zur Annahme des Bundesverkehrswegeplans 2030.“ *Bundesanzeiger*, 01.08.2016. Zuletzt geprüft am 22.11.2018.
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** „Bundeshaushaltsplan 2017: Einzelplan 12.“ Zuletzt geprüft am 13.11.2017. https://www.bundshaushalt-info.de/fileadmin/de.bundshaushalt/content_de/dokumente/2017/soll/epl12.pdf#page=17.

- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur:** *Bundeshaushaltsplan 2017 – Einzelplan 12*. Berlin, 2017. Zuletzt geprüft am 18.12.2017.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung:** *Bundeshaushaltsplan 2012 – Einzelplan 12*. Berlin, 2012. Zuletzt geprüft am 18.12.2017.
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung:** *Bundeshaushaltsplan 2013 – Einzelplan 12*. Berlin, 2013. Zuletzt geprüft am 18.12.2017.
- Bundesrepublik Deutschland,** *Bundeshaushaltsordnung*. BHO. 19.08.1969.
- Bundesrepublik Deutschland,** *Straßenverkehrsordnung*. StVO. 01.04.2013.
- Bundesrepublik Deutschland,** *Verordnung über die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen*. HOAI. 17.07.2013.
- Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.:** „Verkehrsinfrastruktur – Was ist zu tun?“. <https://bdi.eu/artikel/news/verkehrsinfrastruktur-was-ist-zu-tun/>.
- Bundeszentrale für politische Bildung:** „Grundsätze der Steuerpolitik: Was sind eigentlich Steuern?“ *Informationen zur politischen Bildung*, Nr. 288 (2012): 4–11.
- Bundeszentrale für politische Bildung:** „Tourismusverkehr.“.
- Deutscher Bundestag,** *Gesetz über die Grundsätze des Haushaltsrechts des Bundes und der Länder*. Haushaltsgrundsätzegesetz - HGrG. 19.08.1969.
- Deutscher Bundestag:** *Straßenbaubericht 2000: Drucksache 14/5064*. Berlin, 2001.
- Deutscher Bundestag,** *Raumordnungsgesetz*. ROG. 2008.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Begriffe der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Grundlagen der Instandhaltung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Raumfahrtproduktsicherung – Kontrolle von kritischen Teilen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2014.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2015.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Kraftstoffe – Unverbleite Ottokraftstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V.:** *Kraftstoffe – Dieseldieselkraftstoff – Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2017.
- Dudenverlag:** „Kri-ti-ka-li-tät, die.“ Bibliographisches Institut GmbH. <https://www.duden.de/rechtschreibung/Kritikalitaet>.
- Egan, Matthew J.:** „Anticipating Future Vulnerability: Defining Characteristics of Increasingly Critical Infrastructure-like Systems.“ In *Journal of Contingencies and Crisis Management*. 2007.
- Engels, Jens I.:** „Relevante Beziehungen. Vom Nutzen des Kritikalitätskonzepts für Geisteswissenschaftler.“ In *Was heißt Kritikalität?* Hrsg. von Alfred Nordmann. Bielefeld: Transcript Verlag, 2018.

- European Commission:** *Impact Assessment Guidelines*. 2009.
http://ec.europa.eu/smart-regulation/impact/commission_guidelines/docs/iag_2009_en.pdf.
- European Cooperation for Space Standardization:** *ECSS-Q-ST-30-02C – Space product assurance: Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA)*. Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2009.
- European Cooperation for Space Standardization:** *ECSS-Q-HB-80-03A DIR1 – Space product assurance: Software dependability and safety*. Noordwijk: ESA Requirements and Standards Division, 2017.
- Fekete, Alexander:** „Schlüsselbegriffe im Bevölkerungsschutz zur Untersuchung der Bedeutsamkeit von Infrastrukturen: von Gefährdung und Kritikalität zu Resilienz und persönlichen Infrastrukturen.“ In *Krisenmanagement – Notfallplanung – Bevölkerungsschutz: Festschrift anlässlich 60 Jahre Ausbildung im Bevölkerungsschutz, dargebracht von Partnern, Freunden und Mitarbeitern des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe*. Hrsg. von Christoph Unger, Thomas Mitschke und Dirk Freudenberg. Berlin: Duncker & Humblot, 2013.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen:** *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Reihe A – Auswertung; Abschnitt A1; Unterabschnitt A 1.1; Zustandsbewertung bei messtechnischer Erfassung*. Köln: FGSV-Verlag, 2001.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen:** *Richtlinien für die Planung von Erhaltungsmaßnahmen an Straßenbefestigungen: RPE-Stra 01*. Köln: FGSV, 2001.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen:** *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Reihe R – Rechnergestützte Erhaltungsplanung für Fahrbahnbefestigungen Abschnitt R1*. Köln: FGSV-Verlag, 2003.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen:** *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 – Reihe S – Substanzwert (Bestand)*. Köln: FGSV-Verlag, 2003.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen:** *Arbeitsausschuss Systematik der Straßenerhaltung: AP 9 - Gliederung*. Köln: FGSV-Verlag, 2007.
- Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Verkehrsplanung:** *Empfehlungen für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen an Straßen*. Köln: FGSV, 1997.
- Forsthoff, Ernst:** *Die Verwaltung als Leistungsträger*. Stuttgart, Berlin, 1938.
- Genfer Konventionen:** *Zusatzprotokoll I - über den Schutz der Opfer internationaler bewaffneter Konflikte*. 1977.
- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit:** *Handbuch zur Kritikalität - Kritikalität und nukleare Sicherheit*. Überarb. Aufl. GRS 379. Köln: Ges. für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS), 2015.
- Geyer, Sebastian; Winner, Hermann; Bengler, Klaus:** *Entwicklung und Evaluierung eines kooperativen Interaktionskonzepts an Entscheidungspunkten für die teilautomatisierte, manöverbasierte Fahrzeugführung*. Darmstadt, 2013. Dissertation.

- Greiner, Peter; Mayer, Peter E; Stark, Karlhans:** *Baubetriebslehre – Projektmanagement: Wie Bauprojekte erfolgreich gesteuert werden*. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2005.
- Grünfelder, Stephan:** *Software-Test für Embedded Systems: Ein Praxishandbuch für Entwickler, Tester und technische Projektleiter*. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag, 2013.
- Gutenberg, Erich:** *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre: Die Produktion*. 24., unveränderte Auflage. Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1971. doi:10.1007/978-3-642-61989-2.
- Harper, Douglas:** „Online Etymology Dictionary.“ Zuletzt geprüft am 23.11.2018.
- Hellebrandt & Saeid Mahmoudi GbR; AVISO GmbH:** „Bewertungsverfahren zur Aufstellung des 7. Ausbauplans für die Staatsstraßen in Bayern: Teil: Nutzen-Kosten-Analyse (NKA).“
- Hellerforth, Michaela:** *Handbuch Facility Management für Immobilienunternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. doi:10.1007/3-540-32197-7.
- Heymann, Eric; Alfen, Hans W; Tegner, Henning:** *Privatisierungsoptionen für das deutsche Autobahnnetz*. Frankfurt am Main, 2006.
- Hoffmann, Esther:** „Kritische Infrastruktur im Klimawandel.“ Berlin, 15.11.2012.
- Hoffmann, Klaus:** *Handbuch corporate real estate management*. 2., aktualisierte und erw. Aufl. Immobilien-Wissen. Köln: Müller, 1998.
- Innenministerium Baden-Württemberg, Gemeindehaushaltsverordnung Baden-Württemberg.** GemHVO. 01.01.2010.
- Intraplan Consult GmbH im Auftrag des Bundesministers für Verkehr:** *Anleitung für standardisierten Bewertung von Verkehrswegeinvestitionen des öffentlichen Personenverkehrs – Band 1*. Düsseldorf, München, 1981.
- Jochimsen, Reimut:** *Theorie der Infrastruktur*. Tübingen: Mohr, 1966.
- Jochimsen, Reimut; Gustafsson, Knut:** „Artikel Infrastruktur.“ *Handwörterbuch der Raumforschung und Raumordnung* 2. Aufl., 2. Band (1970).
- Jochimsen, Reimut; Heilemann, Ullrich; Simonis, Udo E.:** *Ökonomie für die Politik – Politik für die Ökonomie: Ausgewählte Schriften. Hrsg. von Ullrich Heilemann*. Volkswirtschaftliche Schriften v.534. Berlin: Duncker & Humblot, 2015.
- Kalusche, Wolfdietrich:** „Nutzungskosten im Hochbau - Grundlagen und Anwendung.“ Brandenburgische Technische Universität Cottbus, 2005.
- Kern, B.-R.:** „Rechtsgrundlagen für die Einsätze im Katastrophenfall und die Triage.“ *Katastrophenmedizin*, 2013, 43–66.
- Kiwit, Daniel; Voigt, Stefan:** „Überlegungen Zum Institutionellen Wandel Unter Berücksichtigung Des Verhältnisses Interner Und Externer Institutionen.“ *ORDO: Jahrbuch Für Die Ordnung Von Wirtschaft Und Gesellschaft* 1995, Nr. 46: 117–148.
- Kleinewefers, Henner:** *Einführung in die Wohlfahrtsökonomie: Theorie – Anwendung – Kritik*. Stuttgart: Kohlhammer, 2008.
- Klingenberger, Jörg:** „Ein Beitrag zur systematischen Instandhaltung von Gebäuden.“ Dissertation, Institut für Baubetrieb TU Darmstadt, 2007.

- Knorr, Andreas:** „Gemeinwohl und Daseinsvorsorge in der Infrastruktur.“ *Neuere Entwicklungen in der Infrastrukturpolitik*, Nr. 157 (2005).
- Kopper, Christopher; Hartwig, Karl-Hans; Rothengatter, Werner; Gawel, Erik; Eisenkopf, Alexander:** *Die Verkehrsinfrastruktur in Deutschland: Marode und unterfinanziert* 93. 2013. doi:10.1007/s10273-013-1582-5.
- Kreibich, Rolf:** „Zukunftsforschung: Arbeitsbericht Nr. 23/2006.“
- Krug, Klaus-Eberhard:** „Wirtschaftliche Instandhaltung von Wohngebäuden durch methodische Inspektion und Instandsetzungsplanung.“ Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1985.
- Lai, Albert W.:** *Consumer Values, Product Benefits and Costumor Value*. Advance in Consumer Research 22. 1995.
- Lampert, Timm:** *Klassische Logik: Einführung mit interaktiven Übungen*. 2., vollst. überarb. Aufl. Logos 5. Frankfurt: Ontos-Verl., 2005.
- Land Baden-Württemberg, Gemeindeordnung Baden-Württemberg.** GemO. 23.02.2017.
- Libbe, Jens; Köhler, Hadia; Beckmann, Klaus J.:** *Infrastruktur und Stadtentwicklung: Technische und soziale Infrastrukturen – Herausforderungen und Handlungsoptionen für Infrastruktur- und Stadtplanung: [Forschungsprojekt des Deutschen Instituts für Urbanistik (Difu) im Auftrag der Wüstenrot-Stiftung]*. Edition Difu - Stadt, Forschung, Praxis 10. Berlin: Dt. Inst. für Urbanistik, 2010.
- Link, Heike; Kalinowska, Dominika; Kunert, Uwe; Radke, Sabine:** „Wegekosten und Wegekostendeckung des Straßen- und Schienenverkehrs in Deutschland 2007: Endbericht.“ Forschungsprojekt im Auftrag des BGL, ADAC und BDI.
- Marshall, Tim, Erloff, Michael, Hrsg.:** *Design dictionary: Perspectives on design terminology*. Board of International Research in Design. Basel, Boston: Birkhäuser Verlag, 2008.
- Mayntz, Renate:** *Modellkonstruktion: Ansatz Typen und Zweck*. Formalisierte Modelle in der Soziologie. Neuwied/Berlin: Luchterhand, 1967.
- Meyna, Arno; Pauli, Bernhard:** *Taschenbuch der Zuverlässigkeitstechnik: Quantitative Bewertungsverfahren*. 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. Praxisreihe Qualitätswissen. München: Hanser, 2010. doi:10.3139/9783446424326.
- Mühlenkamp, Holger:** *Kosten-Nutzen-Analyse*. München: Oldenbourg, 1994.
- Mühlenkamp, Holger:** *E-Government: Grundlagen, Instrumente, Strategien*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2010.
- Mühlenkamp, Holger:** *Wirtschaftlichkeit im öffentlichen Sektor: Wirtschaftlichkeitsvergleiche und Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen*. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, 2015.
- NATO Infrastructure Committee:** „50 Years of Infrastructure: NATO Security Investment Programme: Sharing Roles, Risks, Responsibilities, Costs And Benefits.“ <https://www.nato.int/structur/intrastruc/50-years.pdf>.
- P Lee, Charlotte; Schmidt, Kjeld:** „A Bridge too far? Critical Remarks on the Concept of Computer-Supported Cooperative Work and Information Systems.“ *Socio-*

- Informatics: A Practice-based Perspective on the Design and Use of IT Artifacts*, 2018, pp. 177 – 217 (chapter 5).
- Parlamentarischer Rat**, *Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland*. GG. 23.05.1949.
- Piekenbrock, Dirk**: *Einführung in die Volkswirtschaftslehre und Mikroökonomie*. BA kompakt. Heidelberg: Physica-Verl., 2008.
- Pollert, Achim; Kirchner, Bernd; Pollert, Marc C; Bauer, Michael**: *Duden Wirtschaft von A bis Z*. 6. Auflage. Duden. Berlin: Dudenverlag, 2016.
- Reinsel, David; Gantz, John; Rydning, John**: „Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical.“
- Reitsam, Charlotte**: „Reichsautobahn im Spannungsfeld von Natur und Technik: Internationale und interdisziplinäre Verflechtungen.“ Habilitationsschrift, Fakultät für Architektur Technische Universität München, 26.07.2004.
- Ronellenfitsch, Michael**: „Daseinsvorsorge als Rechtsbegriff.“ *Kolloquium aus Anlass des 100. Geburtstags von Prof. h. c. Ernst Forsthoff* 2003 (2003).
- Schenk, Michael**: *Instandhaltung technischer Systeme: Methoden und Werkzeuge zur Gewährleistung eines sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetriebs*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- Schönfelder, Uwe**: „Verfahren zur Ermittlung des Abnutzungsvorrats von Baustoffen als Grundlage für Instandhaltungsstrategien am Beispiel der Gebäudehülle.“ Dissertation TU Dortmund, 2010.
- Schulz, Wolfram H., Mainka, Miriam**: „Gesamtwirtschaftliche Bewertung der Sperrung der A1-Rheinbrücke für den Lkw-Verkehr: Wissenschaftliche Studie im Auftrag von Pro Mobilität – Initiative für Verkehrsinfrastruktur e.V.“.
- Schweer, H.-H.**: *Die Kritikalitätssicherheit beim Transport von Kernbrennstoffen*. Braunschweig: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1982.
- Seibold, Holger**: *IT-Risikomanagement*. 1. Aufl. München: Oldenbourg-Verlag, 2006. doi:10.1524/9783486840346.
- Smith, Adam**: *Der Wohlstand der Nationen: Eine Untersuchung seiner Natur und seiner Ursachen*. 8. Aufl. Dtv 2208. München: Dt. Taschenbuch-Verl., 1999.
- Socina, Mihai; Komma, Christian**: *Kennzahlen für die gesamtwirtschaftliche Bewertung von Erhaltungsstrategien*. Forschung – Strassenbau und Verkehrstechnik 1113. Bremen: Wirtschaftsverlag NW, 2015.
- Stock, Wilfried; Bernecker, Tobias**: *Verkehrsökonomie: Eine volkswirtschaftlich-empirische Einführung in die Verkehrswissenschaft*. 2., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden: Springer Gabler, 2014. doi:10.1007/978-3-658-02308-9.
- Stohler, Jacques**: „Zur rationalen Planung der Infrastruktur.“ *Konjunkturpolitik* 1965, Nr. 11 (1965).
- Strauß, Jürgen**: „Infrastruktursicherheit.“ In *Handbuch Sicherheitsgefahren*. Hrsg. von Thomas Jäger. Globale Gesellschaft und internationale Beziehungen. Wiesbaden: Springer VS, 2015.

- Sturm, P; Gluth, G.J.G; Jäger, C; Brouwers, H.J.H; Kühne, H.-C.:** „Sulfuric acid resistance of one-part alkali-activated mortars.“ *Cement and Concrete Research* 2018, Nr. 109 (2018): 54–63.
- Stütze, Thomas:** *Volkswirtschaftlich gerechtfertigte Interventionswerte für die Erhaltung von Bundesautobahnen*. Berlin: Technische Universität, 2004.
- Suppes, Patrick:** *Warum Formalisierung in der Wissenschaft erwünscht ist*. Zur Logik empirischer Theorien. Berlin u.a.: de Gruyter, 1983.
- Susanne Lenz:** *Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen*. Forschung im Bevölkerungsschutz 1. Bonn, 2009.
- Tamke, Andreas:** *Simulation und Bewertung von Verkehrsszenen für Fahrerassistenzsysteme im Kreuzungsbereich*. BV-Forschungsberichte 2013,2. Aachen: Shaker, 2013. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013.
- Thommen, Jean-Paul:** *Managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*. 8., überarb. und erw. Aufl. Zürich: Versus, 2008.
- Treiber, Martin; Kesting, Arne:** *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- UBA Berlin, BUWAL Bern, UBA Wien:** *Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 2.1*. Unter Mitarbeit von Mario Keller, Peter de Haan und et al. Bern, 2004. Dokumentation.
- Universität Marburg:** „Womit beschäftigt sich die Wirtschaftswissenschaft?“. https://web.archive.org/web/20110222044456/http://www.uni-marburg.de/fb02/studium/studgang/studinteressierte/studium_allg/wiwi.
- van Laak, Dirk:** *Alles im Fluss: Die Lebensadern unserer Gesellschaft: Geschichte und Zukunft der Infrastruktur*. Frankfurt am Main: S. Fischer, 2018.
- Verein Deutscher Ingenieure:** „Jahresbericht: Die VDI-Gruppe.“ Zuletzt geprüft am 23.05.2019. <http://jahresbericht.vdi.de/spezial-kapitel/die-vdi-gruppe/>.
- Verein Deutscher Ingenieure:** „VDI-Richtlinien: Rechtliche Bedeutung der VDI-Richtlinien.“ Zuletzt geprüft am 23.05.2019. <https://www.vdi.de/richtlinien>.
- Vester, Frederic:** *Die Kunst vernetzt zu denken: Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome*. Aktualisierte u. erw. Taschenbuchausg. Dtv 33077. München: Dt. Taschenbuch Verl., 2002.
- Weizsäcker, Robert K. Frhr. von:** „Industrieökonomik: Grundlagen der Mikroökonomik.“ Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre – Finanzwissenschaft und Industrieökonomik TU München, 2013.
- Winkel, R; Greiving, S; Pietschmann, H.:** *Sicherung der Daseinsvorsorge und Zentrale-Orte-Konzepte: gesellschaftliche Ziele und räumliche Organisation in der Diskussion*. Bonn, 2007.
- Wöhe, Günter; Döring, Ulrich; Brösel, Gerrit:** *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 26. überarbeitete und aktualisierte Auflage. Vahlers Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften. München: Verlag Franz Vahlen, 2016.
- Wong, Stanley:** „positive economics.“ *The New Palgrave: A Dictionary of Economics*, 1987, 920–921.

- Zekl, Hans G; Aristoteles:** *Organon*. Philosophische Bibliothek 492. Hamburg: Meiner, 1997.
- Zelewski, Stephan:** *Strukturalistische Produktionstheorie*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1993. doi:10.1007/978-3-322-96173-0.
- Zimmermann, Josef:** „Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden.“ Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung TU München, 08/2013.
- Zimmermann, Josef:** „Immobilienprojektentwicklung.“ Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung TU München, 10/2013.
- Zimmermann, Josef:** „Immobilienwert und Wertermittlungsmethoden.“ Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung TU München, 07/2014.
- Zimmermann, Josef:** „Die Immobilie als Gegenstand der Ingenieurwissenschaften in Praxis, Forschung und Lehre.“ *Bauingenieur* 2015, Nr. 90 (2015): 115–128.
- Zimmermann, Josef:** „Grundlagen prozessorientierter Planung und Organisation.“ Vorlesungsskriptum, Lehrstuhl Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung TU München, 10/2017.
- Zimmermann, Josef; Eber, Wolfgang:** „Mathematical Background of Key Performance Indicators for Organizational Structures in Construction and Real Estate Management.“ *Procedia Engineering* 85 (2014): 571–580. doi:10.1016/j.proeng.2014.10.585.
- Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian; Osterried, Julia; Hoffeller, Marina:** *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase*. München: TU München, 2017. Forschungsbericht.
- Zimmermann, Josef; Ziegel, Christian; Osterried, Julia; Hoffeller, Marina:** *Infrastrukturmanagement unter besonderer Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten in der Betriebsphase – Teil 1*. München: TU München, 2017. Forschungsbericht.
- Zimmermann, Josef e. a.:** „INSP-EG. Instandsetzungsprognose für Empfangsgebäude – Schlussbericht.“ Studie, Lehrstuhl für Bauprozessmanagement und Immobilienentwicklung TU München, 2007.
- Zukunftsinstitut GmbH:** „Urbanisierung: Die Stadt von morgen.“ *Megatrend Urbanisierung* 2018.

